

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ГИДРОТРАНСПОРТА УГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Розроблено методику розрахунку параметрів гідротранспорту вугільних суспензій високої концентрації, яка орієнтована на використання в технології вугільного палива та дозволяє розраховувати параметри гідротранспорту в структурованих режимах

THE CALCULATION PROCEDURE OF HYDROTRANSPORT PARAMETERS OF HIGH CONCENTRATION COAL SUSPENSIONS

The procedure of calculation of hydrotransport parameters of high concentration coal suspensions is elaborated. It is oriented on using in coal fuel technologies and allows calculation of hydrotransport parameters in structured regimes

Введение. Значительная зависимость Украины от импортируемых энергоресурсов, существенная экологическая нагрузка на промышленные регионы, обусловленная большими объемами складированных шламов и загрязнением воздушного пространства, ухудшение горно-геологических факторов ведения горных работ, сформировали условия, в которых применение водоугольного топлива (ВУТ) является наиболее перспективным, малозатратным, быстро окупаемым и ресурсосберегающим решением [1].

Успешный мировой опыт использования, разработки специалистов бывшего СССР, а также научный потенциал отечественных ученых свидетельствуют о высокой эффективности таких технологий [2]. Традиционно технологии ВУТ разделяют на три группы: приготовление; транспортирование и хранение; а также сжигание. На сегодняшний день технологии приготовления и сжигания ВУТ достаточно освоены отечественными специалистами. Существуют апробированные технические решения по адаптации топков и котлов, специальные установки для сжигания ВУТ, известны отечественные рецептуры пластификаторов и антикоагулянтов, а также технологические регламенты получения угольных суспензий высокой концентрации (УСВК) с заданными реологическими, теплотехническими и гидравлическими характеристиками. Отечественные же технологии транспортирования и хранения ВУТ разработаны не так хорошо, что обусловлено фокусированием исследований в области пульп малой и средней концентрации, вызванным особенностями гидротранспорта на углеобогатительных фабриках и коксохимических комбинатах Украины [3 – 5]. С учетом технологических задач, которые решают гидротранспортные комплексы технологий ВУТ, целесообразно рассматривать следующие три режима течения: бингамовский режим течения вязкопластичной жидкости с ядром потока; псевдоламинарный режим течения; турбулентный режим. Для последних двух режимов методическая база расчетов наиболее разработана, так как эти режимы практически аналогичны сверхкритическим режимам пульп низкой и средней концентрации. Однако для транспортирования УСВК наиболее рациональным

является первый режим, позволяющий обеспечить высокий расход твердой фазы с минимальными энергозатратами. Однако для этого режима течения в силу целого ряда исторических и методических факторов методическая база расчетов окончательно не сформировалась. Это сдерживает внедрение технологий ВУТ, поскольку эффективность применения этих технологий и их преимущество перед существующими определяются точностью расчета и соблюдения параметров на каждом технологическом участке.

Таким образом, разработка методов расчета параметров гидротранспорта УСВК с учетом гранулометрического состава угля и реологических характеристик смеси, обеспечивающих максимальный энергетический потенциал ВУТ, является актуальной научно-практической задачей.

Целью данной статьи является разработка методики расчета параметров гидротранспорта УСВК для технологий ВУТ.

Основной задачей гидротранспортных установок технологий ВУТ является обеспечение максимальной производительности по твердой фазе. Эта величина измеряется в т/ч и некоторыми авторами называется грузопотоком [4, 6]

$$G = \rho_S C_p Q, \quad (1)$$

где C_p – расходная объемная концентрация суспензии; ρ_S – плотность твердой фазы.

Из формулы (1) видно, что высоких значений грузопотока можно добиться двумя способами – увеличивая расход суспензии и обеспечивая ее максимально возможную концентрацию. С учетом последнего в формуле (1) вместо расходной можно использовать истинную объемную концентрацию, которая рассчитывается по величине предельно возможной для рассматриваемых установок массовой концентрации суспензии [5, 6]

$$G = \frac{\rho_S \rho_0 C_m}{\rho_S - (\rho_S - \rho_0) C_m} Q, \quad (2)$$

где C_m – предельно возможная для рассматриваемых установок массовая концентрация суспензии.

На основании зависимости (2) с учетом экспериментально полученного выражения для рабочей концентрации УСВК [5] регламентированный расход и плотность суспензии будут рассчитываться по формулам

$$Q_P = \left(1 - \frac{\rho_S}{\rho_0} \frac{1 - C_m}{C_m} \right) \frac{G_P}{\rho_S}; \quad \rho = \frac{1}{\frac{1 - C_m}{\rho_0} + \frac{C_m}{\rho_S}}, \quad (3)$$

где Q_P – требуемый объемный расход УСВК; ρ – плотность УСВК.

Высокая концентрация ВУТ предполагает использование при расчетах пара-

метров его гидротранспорта реологических зависимостей, да и физическая картина течения таких пульп принципиально отличается от известных. С учетом результатов лабораторных исследований [1, 5] реологическая характеристика УСВК удовлетворительно описывается уравнением Бингама-Шведова и определяется двумя параметрами – начальным напряжением сдвига и эффективной вязкостью суспензии. Значения этих величин для исследуемых УСВК определены посредством обработки графиков реологических характеристик, а также установлена их зависимость от основных физико-технических факторов [1, 2, 5].

Большинство авторов для описания зависимости расхода пульпы от действующего перепада давлений предлагают использовать упрощенное уравнение Букингама, которое предполагает линейную зависимость между гидравлическим уклоном и расходом пульпы [7, 8]

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left(1 - \frac{4}{3} \frac{2\tau_0 L}{R\Delta P} \right); \quad i = \frac{8\eta Q}{g\rho\pi R^4} + \frac{8\tau_0}{3g\rho R}, \quad (4)$$

где Q – расход УСВК; π – константа, равная 3,14; R – внутренний радиус трубы; ΔP – действующий перепад давлений; η – эффективная вязкость УСВК; L – длина трубопровода; τ_0 – предел текучести УСВК; i – гидравлический уклон; ρ – плотность УСВК; g – ускорение свободного падения.

Некоторые авторы указывают, что для определенных диаметров труб и концентраций гидросмеси применение упрощенного уравнения Букингама недопустимо, и предлагают использовать линейную аппроксимацию этого уравнения в виде [2]

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left(a - b \frac{2\tau_0 L}{R\Delta P} \right); \quad i = \frac{8}{a} \frac{\eta Q}{\pi R^4 \rho g} + 4 \frac{b}{a} \frac{\tau_0}{\rho g R}, \quad (5)$$

где a, b – опытные коэффициенты, зависящие от вида транспортируемой суспензии и определяемые по экспериментальным данным.

Полное уравнение Букингама при расчетах практически не используется, хотя его точное решение получить достаточно просто:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta L} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{2\tau_0 L}{R\Delta P} + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R\Delta P} \right)^2 \right]; \quad i = \frac{1}{\frac{\sigma}{2} + \sqrt{\frac{2}{\sigma} \sqrt{1 + \frac{3\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} - \left(\frac{\sigma}{2} \right)^2}}} \frac{2\tau_0}{\rho g R};$$

$$\sigma = \sqrt[3]{1 + \frac{3\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} + \sqrt{\left(1 + \frac{3\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} \right)^2}} - 1 + \sqrt[3]{1 + \frac{3\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} - \sqrt{\left(1 + \frac{3\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} \right)^2}} - 1.$$

Известно несколько видов записи этого решения [7, 8], однако ни одно из них не получило широкого распространения. Одной из причин этого считается невозможность определения с их помощью требуемого диаметра трубы.

Другим фактором, ограничивающим возможность применения всех вышеприведенных формул, является игнорирование в них расхода УСВК в ядре потока, так как все они получены интегрированием от стенки трубы до границы ядра, движущегося с некоторой скоростью [2, 7, 8].

С учетом этого расход УСВК в ядре потока при стержневом режиме, а также расход через кольцевое сечение между ядром и стенкой трубы можно определить по формулам

$$\theta_o = \frac{\eta Q_o}{\pi R^3 \tau_o} = (1-A)^2 \frac{A}{2}; \quad \theta_\sigma = \frac{\eta Q_c}{\pi R^3 \tau_o} = \frac{1 - \frac{4}{3}A + \frac{1}{3}A^4}{4A}; \quad A = \frac{R_o}{R} = \frac{2\tau_o L}{R\Delta P},$$

где Q_o – расход УСВК в ядре потока; Q_c – расход УСВК в кольцевом сечении между ядром и стенкой трубы; R_o – радиус ядра.

С учетом последних уравнений величина A , соответствующая суммарному расходу УСВК через поперечное сечение трубопровода, определяется из решения уравнения

$$7A^4 - 12A^3 + 6A^2 - (4 + 3\theta)A + 3 = 0; \quad \theta = \frac{4\eta Q}{\pi R^3 \tau_o}, \quad (6)$$

где Q – расход УСВК через поперечное сечение трубопровода.

Уравнение (6) является модернизированным уравнением Букингама, учитывающим расход УСВК в ядре потока. Решение этого уравнения может быть получено только численно, при этом на отрезке $0 \leq A \leq 1$ существует всего один корень, зависимость обратной величины которого от параметра θ с хорошей точностью может быть аппроксимирована следующей функцией (рис. 1):

$$\frac{R}{2\tau_o} \frac{\Delta P}{L} = 1,056 + 1,007 \frac{4\eta Q}{\pi R^3 \tau_o}. \quad (7)$$

Используя последнее выражение, нетрудно получить для расчета гидравлического уклона зависимость, близкую к формулам (4) и (5):

$$i = \lambda_* \frac{\rho}{\rho_o} \frac{V^2}{2gD}; \quad \lambda_* = \frac{64,435}{Re_*}; \quad Re_* = \frac{Re}{1 + 0,066 \frac{Re}{Eu}}; \quad Re = \frac{\rho DV}{\eta}; \quad Eu = \frac{\rho V^2}{2\tau_o}, \quad (8)$$

где λ_* – эффективный коэффициент гидравлического трения; ρ_o – плотность

жидкой фазы; V – среднерасходная скорость течения УСВК; D – диаметр трубы.

Формулы (8) позволяют оценить скорость, при превышении которой влиянием вязкопластических свойств УСВК на гидравлический уклон можно пренебречь:

$$V_{kp}^* = 1,311 \frac{D\tau_0}{\eta}. \quad (9)$$

Однако полученные зависимости (7) – (9) не позволяют выбрать диаметр трубопровода, выявить рациональные значения радиуса ядра потока. Для решения этой задачи исследуем зависимости безразмерных расходов УСВК через ядро и кольцевое сечение от безразмерного радиуса ядра потока (рис. 2 и 3). Из рис. 2 видно, что данная зависимость для безразмерного расхода УСВК через ядро потока имеет максимум, который реализуется при значениях безразмерного радиуса ядра $0,32 \leq A \leq 0,35$. При этом на основании однозначной зависимости между величиной A и безразмерным расходом УСВК через поперечное сечение трубопровода можно установить зависимость между расходом через ядро и через все поперечное сечение трубопровода (рис. 4) и оценить диапазон изменения величины θ , в котором реализуется рассматриваемый максимум: $1,834 \leq \theta \leq 2,099$. С использованием полученных зависимостей можно предложить следующую методику расчета параметров гидротранспорта УСВК.

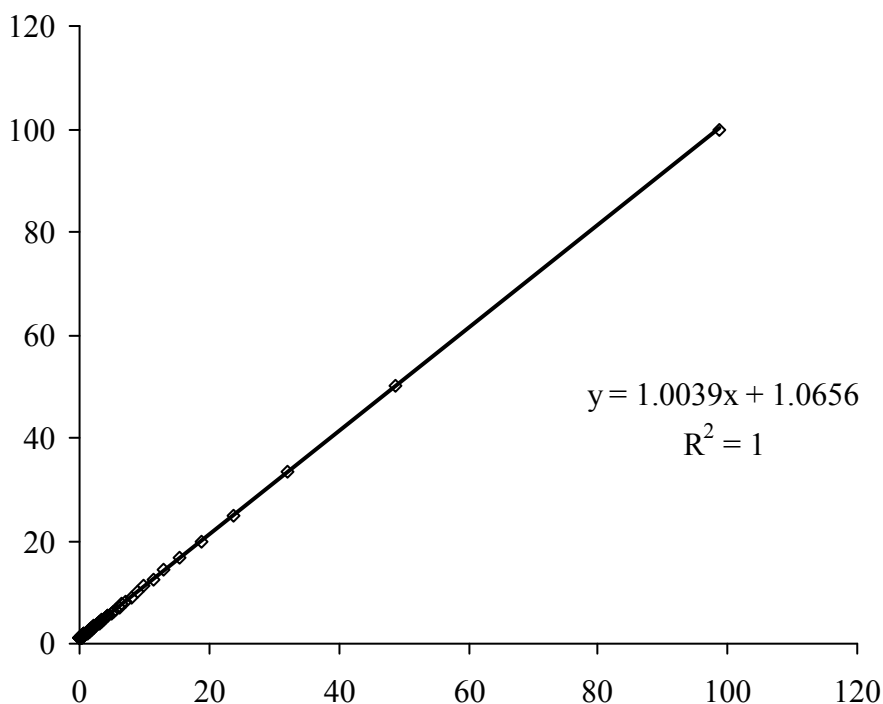


Рис. 1. – Аппроксимация зависимости $\frac{1}{A}$ от безразмерного расхода УСВК θ

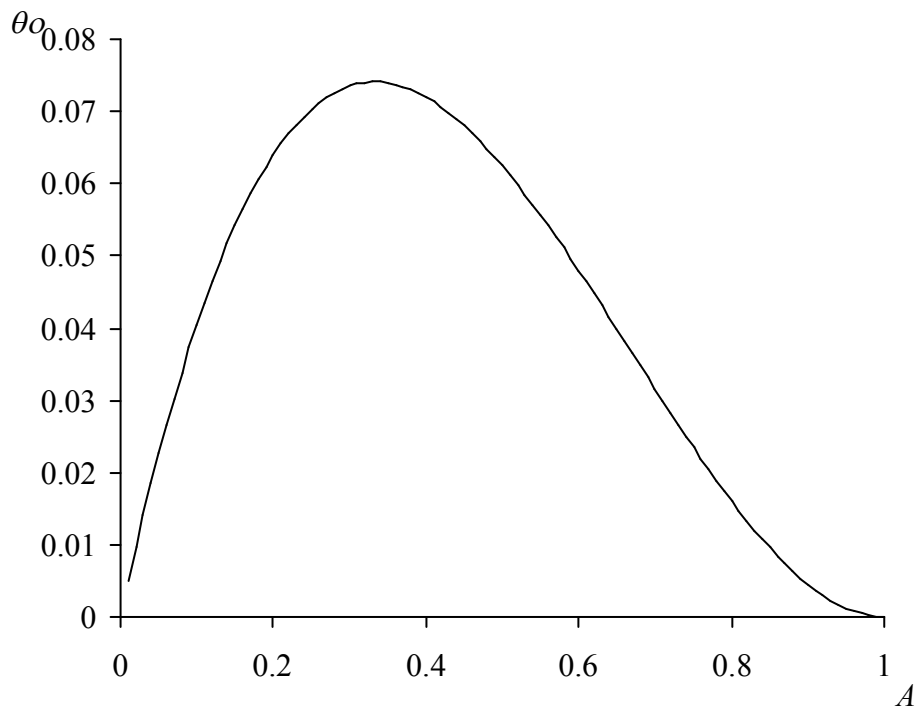


Рис. 2. – Зависимость безразмерного расхода УСВК в ядре потока от безразмерного радиуса ядра потока

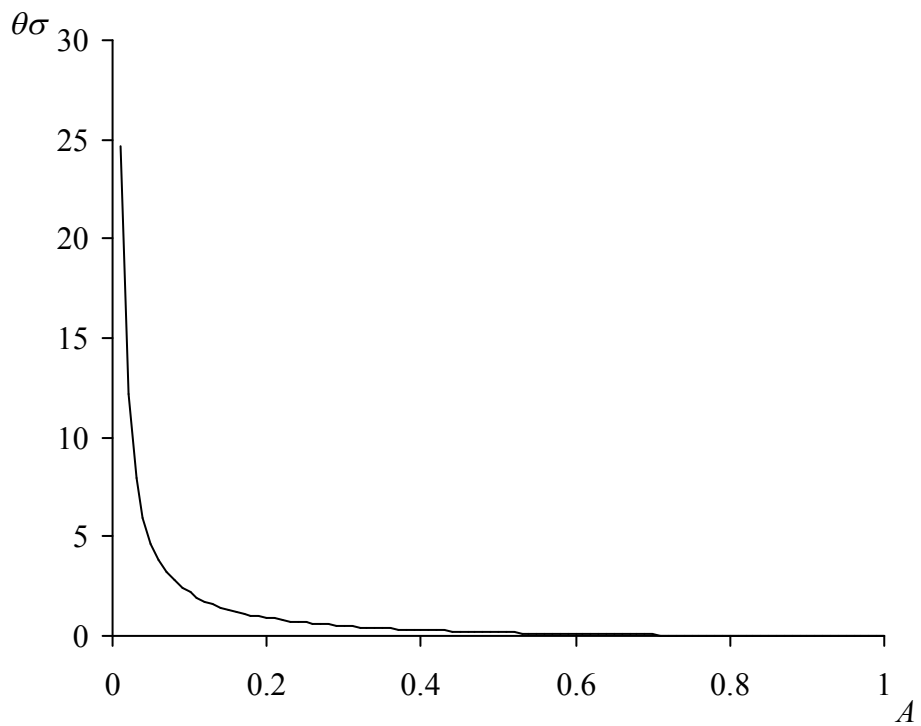


Рис. 3. – Зависимость безразмерного расхода УСВК в зазоре между ядром потока и стенкой трубы от безразмерного радиуса ядра потока

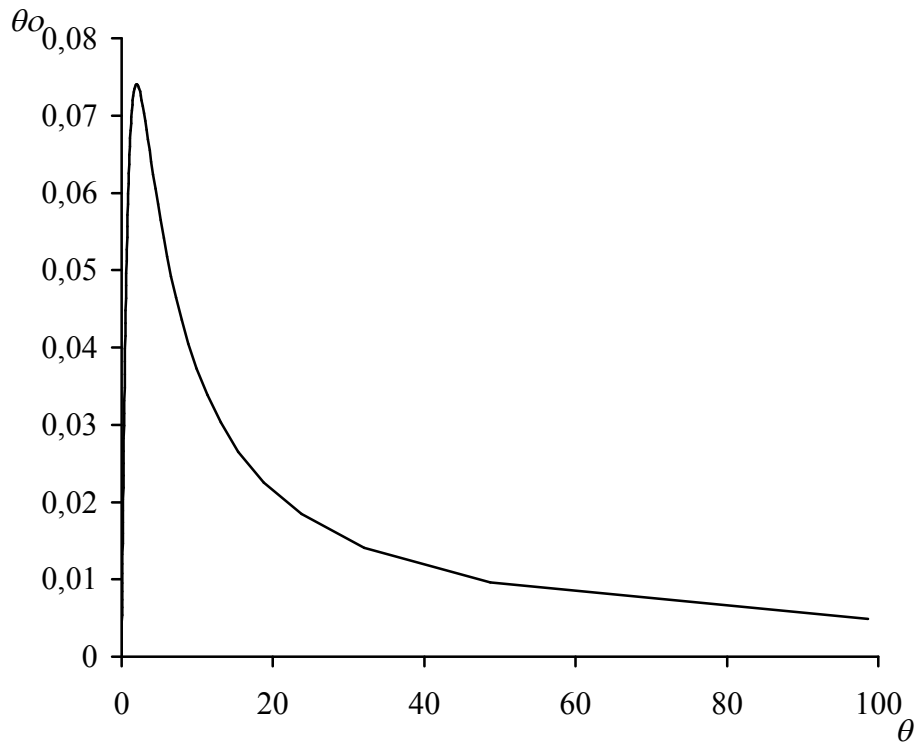


Рис. 4.– Зависимость безразмерного расхода УСВК в ядре потока от безразмерного расхода УСВК через поперечное сечение трубопровода

Полученные оценки экстремума в универсальной зависимости для расхода УСВК в ядре потока позволяют записать следующие критериальные уравнения для перепада давления и расхода УСВК:

$$\frac{2\tau_0 L}{R\Delta P} = A_*; \quad \frac{\eta Q}{\pi R^3 \tau_0} = \theta_*,$$

где A_* – значение безразмерного радиуса ядра потока, соответствующее максимальному расходу УСВК в ядре ($A_* = 0,335$); θ_* – значение безразмерного расхода УСВК через поперечное сечение трубопровода, соответствующее максимальному расходу УСВК в ядре ($\theta_* = 1,967$).

На основании этих уравнений значение гидравлического уклона и расхода УСВК будут рассчитываться по формулам

$$i = \frac{2}{A_*} \frac{\tau_0}{\rho_0 g R}; \quad Q = \theta_* \pi R^3 \frac{\tau_0}{\eta}.$$

При проектировочном расчете, когда заданы производительность установки и плотность УСВК, определяемые по (3), а также длина трубопровода и требуется выбрать радиус трубы и параметры насосного оборудования, расчет производится по следующим формулам:

$$R = 0.545 \sqrt[3]{Q_P \frac{\eta}{\tau_0}}; \quad i = \frac{11}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_P}}; \quad H = \frac{11L}{\rho_0 g} \sqrt[3]{\frac{\tau_0^4}{\eta Q_P}}; \quad N = 11 \frac{\rho}{\rho_0} \sqrt[3]{Q_P^2 \frac{\tau_0^4}{\eta}} \frac{L}{\eta_H},$$

где H – требуемый напор насоса; L – длина трубопровода; N – ориентировочная мощность электродвигателя; η_H – среднее значение КПД насоса.

При поверочном расчете, когда требуется по известным расходно-напорным характеристикам (РНХ) насосов, диаметру и длине трубопровода рассчитать реализуемый расход УСВК, используют зависимость (7). Если рассматриваемые диапазоны расходов УСВК обеспечивают выполнение условия $V < V_{kp}^*$, то УСВК движется с ядром потока, и в этом случае РНХ магистрали гидротранспортной установки рассчитывается по формуле

$$H_T = \frac{\sigma_1 8 \eta L}{\rho_0 g \pi R^4} Q + \left(\frac{\rho}{\rho_0} Z + 2 \sigma_0 \frac{\tau_0 L}{\rho_0 g R} \right),$$

где H_T – РНХ; Z – геодезический подъем трассы.

Если РНХ используемых насосов с достаточной точностью аппроксимируются линейной функцией $H = \gamma - \beta Q$, то реализуемый расход УСВК определяется по формуле

$$Q = \frac{\gamma - \frac{\rho}{\rho_0} Z - 2 \sigma_0 \frac{\tau_0 L}{\rho_0 g R}}{\beta + \frac{\sigma_1 8 \eta L}{\rho_0 g \pi R^4}},$$

где γ, β – коэффициенты аппроксимации РНХ насоса.

Если РНХ используемых насосов аппроксимируются квадратичной параболой $H = \gamma - \beta Q - \alpha Q^2$, то реализуемый расход УСВК определяется по формуле

$$Q = \sqrt{0,25 \left(\frac{\sigma_1 8 \eta L}{\alpha \rho_0 g \pi R^4} + \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\gamma}{\alpha} - \frac{\rho}{\rho_0} \frac{Z}{\alpha} - 2 \sigma_0 \frac{\tau_0 L}{\alpha \rho_0 g R} \right) - 0,5 \left(\frac{\sigma_1 8 \eta L}{\alpha \rho_0 g \pi R^4} + \frac{\beta}{\alpha} \right)},$$

где γ, β, α – коэффициенты аппроксимации РНХ насоса.

Если для рассматриваемых расходов УСВК условие $V < V_{kp}^*$ не выполняется, то РНХ магистрали гидротранспортной установки рассчитывается по формуле

$$H_T = \frac{8 \eta_* L}{\pi \rho R^4} Q + \frac{\rho}{\rho_0} Z,$$

где η_* – вязкость УСВК при псевдоламинарном режиме течения.

Таким образом, с учетом вида функции, используемой для аппроксимации РНХ насосов, подачу УСВК в рассматриваемом режиме рассчитывают по одной из формул

$$Q = \frac{\gamma - \frac{\rho}{\rho_0} Z}{\beta + \frac{8\eta_* L}{\pi \rho R^4}}; \quad Q = \sqrt{0,25 \left(\frac{8\eta_* L}{\alpha \pi \rho R^4} + \frac{\beta}{\alpha} \right)^2 + \left(\frac{\gamma}{\alpha} - \frac{\rho}{\rho_0} \frac{Z}{\alpha} \right) - 0,5 \left(\frac{8\eta_* L}{\alpha \pi \rho R^4} + \frac{\beta}{\alpha} \right)}.$$

Выводы. Таким образом, в статье предлагается методика расчета параметров гидротранспорта УСВК, ориентированная на обеспечение максимально возможного расхода твердой фазы при проектировочном расчете и на два режима течения при поверочном расчете. В отличие от известных методов расчета, предлагаемая методика разработана с учетом транспортирования УСВК в структурированном режиме и позволяет рассчитывать параметры ядра потока.

В результате анализа полученных расчетных зависимостей впервые установлено, что диаметр трубы, обеспечивающей требуемый расход в структурном режиме, обратно пропорционален корню кубическому из предела текучести УСВК, а гидравлический уклон прямо пропорционален этой величине в степени четыре третьих.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круть О.А. Водовугільне паливо. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
2. Смолдырев А.Е., Сафонов Ю.К. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / [Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семеновко]. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
4. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий // [Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семеновко, В.Д. Шурыгин]. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
5. Світлий Ю.Г., Круть О.А. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
6. Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. – К.: Наукова думка, 1990. – 160 с.
7. Рабинович Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980. – 278 с.
8. Яхно О.М., Желяк В.І. Гідравліка неньютоновських рідин. – К.: Вища школа, 1995. – 199 с.