

УДК 532.584:532.772

Семененко Е.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Демченко Т.Д., магистр,
Рыжова С.А., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЯЗКОСТИ СТРУКТУРИРОВАННЫХ
СУСПЕНЗИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ КОНЦЕНТРАЦИИ И СВОЙСТВ
ТВЕРДОЙ ФАЗЫ**

Семененко Є.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
Демченко Т.Д., магістр,
Рижова С.О., магістр
(ІГТМ НАН України)

**ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОЇ В'ЯЗКОСТІ СТРУКТУРОВАНИХ
СУСПЕНЗІЙ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД КОНЦЕНТРАЦІЇ ТА
ВЛАСТИВОСТЕЙ ТВЕРДОЇ ФАЗИ**

Semenenko E.V., D. Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Demchenko T. D., M.Sc. (Tech.),
Ryzhova S.A., M.Sc. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**DETERMINATION OF EFFECTIVE VISCOSITY OF THE STRUCTURED
SUSPENSIONS DEPENDING ON THE CONCENTRATION AND PROPERTIES OF
THE SOLID PHASE**

Аннотация. В статье проанализированы результаты отечественных и зарубежных специалистов, которые исследовали вязкость структурированных суспензий в зависимости от концентрации твердой фазы. Результаты анализа экспериментальных данных позволили обосновать универсальную функцию для аппроксимации зависимости эффективной вязкости структурированных суспензий от концентрации. В предложенной функциональной зависимости свойства твердой фазы и химических реагентов, учитываются величинами коэффициента пропорциональности и показателя степени, которые для водоугольных суспензий зависят от диаметра частиц. Полученные результаты позволяют научно обоснованно определить величину гидравлического уклона и диаметра трубопровода в зависимости от расхода суспензии, что обеспечивает адекватность проектировочного и поверочного расчетов гидротранспортных комплексов, перекачивающих структурированные суспензии по данным о гранулометрическом составе транспортируемых частиц.

Ключевые слова: структурированная суспензия, эффективная вязкость, закон Бингама-Шведова, концентрация, диаметр твердых частиц.

Использование структурированных суспензий при добыче и переработке минерального сырья предопределяется стремлением снизить удельные энергозатраты на транспортирование и удельное водопотребление существующих технологий с целью повышения их рентабельности и конкурентоспособности.

Сокращение запасов технической воды в регионах расположения горных предприятий создает условия для применения данных технологий для транспортировки материалов, влияние которых на реологические характеристики суспензий экспериментально ранее не исследовались. Это сдерживает внедрение перспективных технологических решений, поскольку для расчета величин гидравлического уклона и диаметра трубопровода в зависимости от расхода суспензии необходимо знание величины эффективной вязкости. Таким образом актуальной является задача определения эффективной вязкости структурированных суспензий в зависимости от концентрации по данным о гранулометрическом составе транспортируемых частиц.

Об изменении эффективной вязкости суспензии в зависимости от концентрации и свойств твердых частиц известны разрозненные данные, взятые из различных областей знаний. Так при гидротранспортировании гидросмесей низкой концентрации влиянием крупности твердых частиц обычно пренебрегают [1 – 3]. Однако с увеличением концентрации суспензии, что характерно для химических технологий, на величину эффективной вязкости начинают оказывать влияние не только дисперсность, но и индивидуальные свойства частиц твердой фазы. В зависимости от химического состава твердой фазы исследователи разделяют суспензии на два вида: на суспензии малой вязкости, образуемые кварцем, магнезитом, сульфатом натрия, кальцинированной содой, и суспензии большой вязкости, образуемые углем, глиной, мелом, каолином [4].

В некоторых случаях предлагается влияние гранулометрического состава учитывать не крупностью частиц, а удельной поверхностью частиц твердой фазы. Однако этот подход, пока не нашел широкого применения.

Все исследователи сходятся во мнении, что наиболее сильно эффективная вязкость структурированных суспензий зависят от содержания в смеси частиц тонких фракций. Однако разные группы исследователей выделяют разные верхние границы этих фракций: 40 мкм, 60 мкм, 74 мкм. Такие частицы образуют стабильные суспензии благодаря возникающим между ними структурным или коагуляционным связям. Мерой стабильности таких суспензий служит скорость седиментации частиц твердой фазы, которая в устойчивых средах чрезвычайно мала. В зависимости от технологического предназначения структурированной суспензии выделяют два метода достижения стабильности: подбор гранулометрического состава твердой фазы и применение ПАВ [1, 5 – 8].

Наиболее хорошо изучена зависимость кинематического коэффициента вязкости суспензий от концентрации твердой фазы. Для описания этой зависимости известно довольно много работ, обобщая результаты которых можно констатировать, что кинематический коэффициент вязкости или эффективной вязкости структурированной суспензии можно представить в виде произведения двух сомножителей [9]

$$\eta = \eta_0 \Lambda \mathbf{C}^{\gamma},$$

где η – эффективная вязкость структурированной суспензии; η_0 – эффективная

вязкость жидкой фазы; Λ – безразмерная функция, учитывающая влияние твердых частиц; C – объемная концентрация твердой фазы.

Одной из первых зависимостей рассматриваемого типа является формула А. Эйнштейна, полученная им для разбавленных растворов с объемной концентрацией до 0,4 [4, 9]

$$\Lambda = 1 + 2,5C,$$

которую в последующем уточнил Томас [4, 9 – 11]

$$\Lambda = 1 + 2,5C + 10,05C^2 + 0,00273e^{-16,6C}.$$

После этого многие исследователи предлагали близкие к этим зависимостям формулы, полученные как экспериментальным, так и теоретическим путем, [2, 6, 12, 13]

$$\Lambda = 1,0336 + 2,6343C + 10,88C^2 + 5,2335C^3, \quad \Lambda = 2370 - 1050C' + 200C'^2,$$

$$\Lambda = 1 + 3,5C, \quad \Lambda = \frac{1}{1 - 1,35C^{2,5}}, \quad \Lambda = \frac{1 + 1,5C}{1 - C^2},$$

где C' – массовая концентрация твердой фазы.

В отличие от указанных выражений Франкель и Аквиваса предложили формулу, которая учитывает не только текущую концентрацию суспензии, но и ее предельно возможную величину [4, 6, 14]

$$\Lambda = \frac{3}{8} \frac{\sqrt[3]{C}}{\sqrt[3]{C_*} - \sqrt[3]{C} \sqrt{1 - C}},$$

где C_* – предельная объемная концентрация.

Патен и Рассел, а также Чанг, Христиансен и Баер, соответственно, предложили формулы, согласно которым величина Λ зависит не от абсолютного значения концентрации суспензии, а от отношения его к предельно возможному значению [13, 15, 16]

$$\Lambda = \frac{1}{\left(1 - \frac{C}{C_*}\right)^\beta}, \quad \Lambda = \left(1 + 0,75 \frac{\frac{C}{C_*}}{1 - \frac{C}{C_*}}\right)^2,$$

где β – коэффициент, выбирается экспериментально.

Почти все приведенные формулы, кроме одной, используют для расчетов объемную концентрацию суспензии, что исключает учет плотности твердой фазы. Как показали исследования специалистов ИГМ НАН Украины, результаты

расчетов с использованием массовой концентрации суспензии лучше согласуются с результатами экспериментов [17, 13, 18, 19].

Специалистами научной школы Санкт-Петербургского государственного горного института им. Г.В. Плеханова (технического университета) для отходов обогащения руд цветных металлов была установлена обобщенная зависимость эффективной вязкости структурированных суспензий от массовой концентрации твердой фазы в виде экспоненциальной зависимости (табл. 1) [3, 14, 16, 17]

$$\eta = K_{\eta} e^{bC'}, \quad (1)$$

где K_{η} – коэффициент (табл. 1); b – показатель степени (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры аппроксимации эффективной вязкости структурированных суспензий из отходов обогащения руд [3, 14, 16, 17]

| Руды | K_{η} , Па·с | b |
|----------------|-----------------------|--------|
| медно-цинковые | $5,000 \cdot 10^{-2}$ | 3,122 |
| медные | $1,017 \cdot 10^{-3}$ | 9,933 |
| никелевые | $5,100 \cdot 10^{-5}$ | 17,980 |

Для проверки возможности применения формулы (1) была произведена численная обработка экспериментальных данных М.П. Барановой [15], В.И. Мурко [4], проф. А.П. Юфина и А.Д. Гусарова [9, 10], а также специалистов Санкт-Петербургской научной школы [3, 14, 16, 17]. В ходе этих исследований зависимость эффективной вязкости от массовой концентрации структурированной суспензии подвергалась аппроксимации экспоненциальной, линейной и степенной функциями (табл. 2)

$$\eta = K_p C'^p,$$

где K_p – коэффициент (табл. 2); p – показатель степени (табл. 2).

Результаты численного исследования собранных экспериментальных данных указывают на недопустимость использования линейных функций для аппроксимации зависимости Λ (C) при концентрациях, характерных для структурированных суспензий. В этой области рассматриваемая зависимость носит существенно нелинейный характер, для адекватного описания которого применимы полиномы второго, третьего и более высоких порядков. Однако однотипности и единообразия в величинах коэффициентов при такой аппроксимации не наблюдается.

Кроме того, учитывая известное разложение экспоненты в степенной ряд рассматриваемые аппроксимации полиномами можно считать приближениями разной степени точности к аппроксимации экспоненциальной функцией. Отметим, также, что формула (1) изначально была получена для суспензий высокой концентрации, проявляющих вязкопластические свойства, поэтому ее использование при концентрациях меньших, указанных в табл. 2, требует дополни-

тельного обоснования.

Таблица 2 – Коэффициенты аппроксимации зависимостей для различных экспериментов

| Характеристика твердой фазы | d_s , мм | C' , % | K_η | b | K_p | P |
|--|------------|-----------|--------------------|--------|---------------------|--------|
| Уголь Канско-Ачинского бассейна с реагентом [15] | 0,081 | 40,3/42,9 | $8 \cdot 10^{-31}$ | 1,628 | $8 \cdot 10^{-113}$ | 68,807 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна $A^d = 19,86\%$ [15] | 0,081 | 35,0/46,1 | $6 \cdot 10^{-5}$ | 0,210 | $7 \cdot 10^{-15}$ | 8,518 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна до хранения [15] | 0,081 | 32,4/43,4 | $2 \cdot 10^{-6}$ | 0,325 | $2 \cdot 10^{-20}$ | 12,199 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна после в МБЛ-100 [15] | 0,136 | 49,6/56,0 | $7 \cdot 10^{-8}$ | 0,308 | $9 \cdot 10^{-29}$ | 16,250 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна после цильпесбной мельницы [15] | 0,074 | 48,8/53,8 | 0,024 | 0,056 | $8 \cdot 10^{-6}$ | 2,765 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна после шаровой мельницы [15] | 0,093 | 36,5/40,5 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 0,337 | $4 \cdot 10^{-22}$ | 12,883 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна двух стадийное измельчение [15] | 0,047 | 35,4/40,4 | $9 \cdot 10^{-7}$ | 0,322 | $1 \cdot 10^{-20}$ | 12,200 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна после хранения [15] | 0,050 | 37,6/38,4 | 3157 | -0,266 | $8 \cdot 10^{15}$ | -10,06 |
| Бурый уголь Канско-Ачинского бассейна с реагентом [15] | 0,050 | 45,3/46,9 | 142,58 | -0,107 | $2 \cdot 10^8$ | -4,990 |
| Уголь Канско-Ачинского бассейна $A^d = 16,18\%$ с реагентом [15] | 0,079 | 56,6/60,3 | $1 \cdot 10^{-5}$ | 0,182 | $7 \cdot 10^{-20}$ | 10,698 |
| Уголь шахты «Инская» $A^d = 15,67\%$ [1, 7, 8] | 0,079 | 58,4/65,8 | 0,013 | 0,115 | $1 \cdot 10^{-6}$ | 3,212 |
| Мел отмученный труба диаметром 0,30 м [1, 7, 8, 10] | 0,005 | 52,4/63,5 | 0,033 | 0,050 | $2 \cdot 10^{-11}$ | 6,604 |
| Мел отмученный труба диаметром 0,15 м [1, 7, 8, 10] | 0,005 | 44,5/60,3 | $1 \cdot 10^{-4}$ | 0,113 | $3 \cdot 10^{-12}$ | 5,960 |
| Глино-меловый шлам труба диаметром 0,30 м [1, 7, 8, 10] | 0,008 | 48,5/70,9 | 0,200 | 0,048 | $5 \cdot 10^{-5}$ | 2,723 |
| Суглинок труба диаметром 0,30 м [1, 7, 8, 10] | 0,005 | 62,7/63,5 | 22197 | -0,108 | $5 \cdot 10^{13}$ | -6,832 |
| Меловый шлам с глиной и ССБ труба диаметром 0,25 м [1, 7, 8, 10] | 0,008 | 54,2/61,9 | 0,021 | 0,096 | $3 \cdot 10^{-10}$ | 5,795 |
| Отходы обогащения медных руд [16] | 0,140 | 36,7/49,2 | 0,003 | 0,082 | $2 \cdot 10^{-7}$ | 3,526 |
| Отходы обогащения медно-цинковых руд [17] | 0,044 | 40,0/70,0 | 0,110 | 0,011 | 0,0204 | 0,569 |
| Отходы обогащения никелевых руд [3] | 0,833 | 32,0/76,0 | 0,012 | 0,076 | $4 \cdot 10^{-8}$ | 4,202 |
| Городские стоки [3] | – | 3,4/7,2 | 0,003 | 0,417 | 0,0008 | 2,142 |

Результаты аппроксимации исследуемой зависимости степенными функциями, носят не однозначный характер. Это не позволяет рассматривать такой вид аппроксимации как универсальный (табл. 2). Однако эта зависимость может рассматриваться как обобщение формулы Штаудингер, полученной на основа-

нии многочисленных измерений вязкость растворов веществ из нитевидных и линейных молекул [18]

$$\eta = KMc,$$

где c – концентрация раствора в г/л; M – молекулярный вес; K – величина, зависящая от типа соединения, но внутри гомологического ряда является постоянной.

Рассмотренные формулы не учитывают полидисперсности гранулометрического состава твердой фазы суспензий. Одной из первых попыток учета этого фактора можно считать формулу, предложенную для расчета эффективной вязкости грубодисперсных угольных суспензий [4]

$$\Lambda = 1 + K_A CP_{-45},$$

где K_A – коэффициент, определяемый в зависимости от параметров гранулометрического состава частиц [4]; P_{-45} – доля частиц в гранулометрическом составе твердой фазы крупностью менее 45 мкм.

Дальнейшее развитие эта проблема получила в трудах А.С. Кондратьева и Т.А. Седовой, которые на основе феноменологических моделей получили следующую формулу [4, 7, 8, 18]

$$\Lambda = e^{A^2 C_*^2}, \quad A = \frac{\sum_{i=1}^M \alpha_i P_i}{1 - \sum_{j=1}^M P_{j-1}},$$

где α_i – коэффициент формы частиц i -й фракции; P_i – доля частиц i -й фракции в гранулометрическом составе твердой фазы; M – количество фракции в гранулометрическом составе твердой фазы.

Другой вариант учета фактора полидисперсности гранулометрического состава твердой фазы был предложен специалистами ИГТМ НАН Украины на основе промышленных экспериментов на обогатительной фабрике Вольногорского горно-металлургического комбината [9, 10]

$$\Lambda' = \Lambda \gamma, \quad \gamma = 11,39 \left(\frac{0,208}{d_s} \right)^{0,76+16,11 C},$$

где Λ' – скорректированное значение величины Λ ; γ – параметр, учитывающий влияние гранулометрического состава; d_s – средневзвешенная крупность частиц твердой фазы.

А.Е. Смолдырев [9, 10], на основании данных Д. Лацаруса и А. Сайве, по экспериментальному исследованию эффективной вязкости структурированных суспензий из летучей каменноугольной золы с относительной плотностью 2,233

и средней крупностью частиц 17 мкм подтверждает адекватность формулы (1). При этом из представленных данных следует, что величина b не зависит от крупности твердых частиц, а зависимость коэффициента пропорциональности от диаметра частиц твердой фазы может быть аппроксимирована одно из следующих функций

$$K_{\eta} = 0,0462 - 0,1844d_s + 0,2344d_s^2, \quad K_{\eta} = \frac{0,0041}{d_s^{0,9195}}.$$

Эти результаты подтверждаются исследованиями реологических характеристик структурированных суспензий на основе полиэфирной смолы и частиц глины, полиэтиленовой пудры SPD-860 и SPD-750 [19] (рис. 1), численная обработка которых позволяет предложить следующие зависимости коэффициентов в формуле (1) от диаметра твердых частиц

$$K_{\eta} = 0,7574 - 0,0356d + 0,0007d^2, \quad b = -0,0629 + 0,0379d - 0,0008d^2.$$

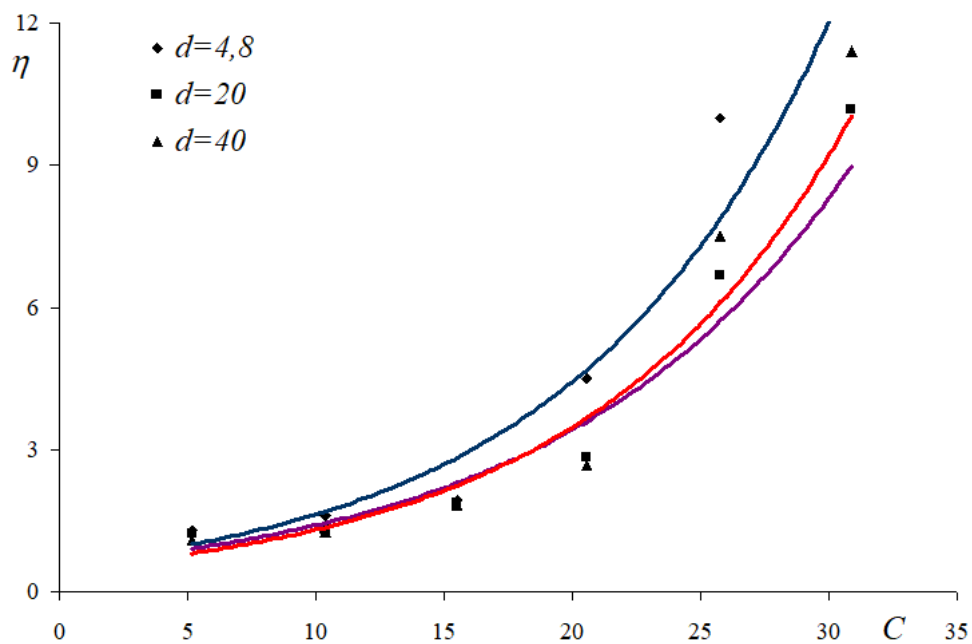


Рисунок 1 – Зависимость эффективной вязкости от объемной концентрации суспензии при различной средневзвешенной крупности частиц (мкм)

Выводы.

1. Результаты проведенной численной обработки показывают, что в рассматриваемых диапазонах параметров, экспоненциальная функция может быть использована для аппроксимации зависимости эффективной вязкости структурированных суспензий от концентрации, с достаточной для инженерных расчетов точностью. Эта зависимость сохраняется во всех рассмотренных случаях, а величины коэффициента пропорциональности и показателя степени зависят от диаметра части твердой фазы. Правда при добавлении реагентов в суспензию, а

также в некоторых других случаях, показатель степени в формуле (1) может изменять знак с положительного на отрицательный, а значение коэффициента пропорциональности может значительно снизиться. Это затрудняет использование этой зависимости в аналитических расчетах.

2. Полученные результаты позволяют научно обоснованно определять величину гидравлического уклона и диаметра трубопровода в зависимости от расхода суспензии, что обеспечивает адекватность проектировочного и поверочного расчетов гидротранспортных комплексов, перекачивающих структурированные суспензии по данным о гранулометрическом составе транспортируемых частиц.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
2. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – Киев: Наукова думка, 2011. – 232 с.
3. Альмагер, М.В. Обоснование технологической схемы и параметров комплекса для транспортирования высококонцентрированной гидросмеси на латеритовых карьерах (республика Куба): дисс. канд. техн. наук: 05.05.06 / Альмагер М.В. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 140 с.
4. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / Мурко В.И. – Новокузнецк: НГНПП Экотехника, 1999. – 289 с.
5. Круть, А.А. Технология приготовления водоугольного топлива с предварительным смешением исходных компонентов / А.А. Круть, Ф.А. Папаяни // Сбірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ, 2001. – № 3. – С. 111 – 118.
6. Криль, С.И. Об эффективной вязкости суспензий сферических частиц / С.И. Криль // Вестник Харьковского политехнического университета. – 2001. – Вып. 129, Т. 1. – С. 147 – 157.
7. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.
8. Ходаков, Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г.С. Ходаков // Рос. хим. журнал. – 2003. - Т. XLVII, №2. – С. 33 – 44.
9. Равичев, Л.В. Моделирование вязкостных свойств концентрированных суспензий / Л.В. Равичев, А.В. Беспалов, В.Я. Логвинов // Теоретические основы химической технологии. – 2008. – Т. 42, №3. – С. 326 – 335.
10. Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
11. Семененко, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных водоугольных суспензий / Е.В. Семененко, А.А. Круть // Форум Горняков – 2011: Материалы международ. конф., октябрь, 2011 г. – Днепропетровск: НГУ, 2011. – С. 205 – 211.
12. Sludge pipe flow pressure drop prediction using composite power-law friction-Reynolds number correlations based on different non-Newtonian / R Haldernwang, V.G Fester, R Holm, R.P Chhabra // Water SA. – 2012. – V. 38, No. 4. - p. 615 – 622.
13. Криль, С.И. До питання про реологічне моделювання суспензій / С.И. Криль, В.П. Берман // Прикладна гідромеханіка. – 2003. – Т. 6(77), №2. – С. 20 – 36.
14. Александров, В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И. Александров. – С.-Пб: СПГИ (ТУ), 2000. – 117 с.
15. Баранова, М.П. Совершенствование технологии получения водоугольных суспензий: дисс. ... канд. техн. наук: 05.14.04 / Баранова М.П. – Красноярск: КГТУ, 2006. – 114 с.
16. Каненков, В.В. Снижение энергоемкости гидравлического транспортирования полидисперсных гидросмесей на предприятиях горной промышленности: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / Каненков В.В. – С.-Пб: ГГИ, 2006. – 150 с.
17. Авксентьев, С.Ю. Определение рациональных режимов гидротранспорта пастообразных хвостов обогащения медно-цинковой руды: дисс. ... кандидата техн. наук: 05.05.06 / Авксентьев С.Ю. – С.-Пб: ГГИ, 2009. – 129 с.

18. Фукс, Г.И. Вязкость и пластичность нефтепродуктов / Г.И. Фукс. – Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. – 328 с.

19. Матвиенко, В.Н. Вязкость и структура дисперсных систем / В.Н. Матвиенко, Е.А. Кирсанов // Вестн. Московского ун-та. С. 2. Химия. / 2011. - Т. 52, № 4. – 243 -276.

REFERENCES

1. Krut, O.A. (2002), *Water-coal fuel* [Hydrocarbon fuel], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.

2. Semenenko, E.V. (2011), *Nauchnye osnovy tekhnologiy gidromekhanizatsii otkrytoy razrabotki titan-tirkonovykh rossyey* [The scientific basis of the technologies of hydromechanization of open development of titanium-zirconium placers], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.

3. Almager, M.V. (2006), “Substantiation of technological scheme and parameters of the complex for transportation of highly concentrated slurry on laterite quarries (Republic of Cuba)”, Abstract of Ph.D. dissertation, mining machines, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.

4. Murko, V.I. (1999), “The scientific basis of processes of obtaining and effective using of water-coal suspensions”, D. Sc. Thesis, Chemical technology of fuel and high-energy agents, Novokuznetsk, Russia.

5. Krut, O.A. (2001), “Technology of preparation of water-coal fuel with preliminary mixing of initial components” *Sbirnyk naukovykh prats Natsionalnogo girnychogo universytetu*, no. 3, pp. 111 – 118.

6. Kril, S.I. (2001), “On the effective viscosity of suspensions of spherical particles”, *Vestnik Harkovskogo politekhnicheskogo universiteta*, vol. 1, no. 129, pp. 147 – 157.

7. Svitliy, Yu.G. and Biletskiy, V.S. (2009), *Gidravlichnyi transport* [Hydraulic transport], Skhidniy vydavnychiy dim, Donetsk, Ukraine.

8. Hodakov, G.S. (2003), “Rheology of suspensions. The theory of phase flow and its experimental justification”, *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal*, vol. XLVII, no. 2, pp. 33 – 44.

9. Ravichev, L.V., Bepalov, A.V. and Logvinov, V.Ya. (2008), “Modeling of viscous properties of concentrated suspensions”, *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, vol. 42, no. 3, pp. 326 – 335.

10. Baranov, Yu.D., Blyuss, B.A., Semenenko, E.V. and Shuryigin, V.D. (2006), *Obosnovanie parametrov i rezhimov raboty gidrotransportnykh sistem gornykh predpriyatiy* [Substantiation of parameters and operating modes of hydrotransport systems of mining enterprises], Novaya ideologiya, Dnepropetrovsk, Ukraine.

11. Semenenko, E.V. and Krut, A.A. (2011), “Calculation of hydro transport parameters for highly concentrated water-coal suspensions”, *Forum Gornyakov* [The Mining Forum], *Materialy mezhdunarodnoy konferentsii* [Materials of the International Conference], Dnepropetrovsk, Ukraine, October 2011, pp.205 – 211.

12. Halderwang, R., Fester, V.G., Holm, R. and Chhabra, R.P. (2012), “Sludge pipe flow pressure drop prediction using composite power-law friction-Reynolds number correlations based on different non-Newtonian”, *Water SA*, vol. 38, no. 4, pp. 615 – 622.

13. Kril, S.I. and Berman, V.P. (2003), “On the question of rheological modeling of suspensions”, *Prikladna gidromekhanika*, vol. 6(77), no. 2, pp. 20 – 36.

14. Aleksandrov, V.I. (2000), *Metody snizheniya energozatrat pri gidravlicheskom transportirovanii smesey vysokoy kontsentratsii* [Methods for reducing energy costs for the hydraulic transportation of high concentration mixtures], Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University), St. Petersburg, Russia.

15. Baranova, M.P. (2006), “Improvement of the technology of obtaining water-coal suspensions”, Abstract of Ph.D. dissertation, Industrial Heat and Power Engineering, Krasnoyarsk State Technical University, Krasnoyarsk, Russia.

16. Kanenkov, V.V. (2006), “Reducing the energy intensity of hydraulic transportation of polydisperse slurry at mining enterprises”, Abstract of Ph.D. dissertation, mining machines, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.

17. Avksentev, S.Yu. (2009), “Determination of rational modes of hydrotransport of paste-like tails of enrichment of copper-zinc ore”, Abstract of Ph.D. dissertation, mining machines, State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia.

18. Fuks, G.I. (2003), *Vyazkost i plastichnost nefteproduktov* [Viscosity and plasticity of petroleum products], Institute of Computer Studies, Moscow-Izhevsk, Russia.

19. Matvienko, V.N. and Kirsanov, E.A. (2011) “The viscosity and structure of disperse systems” *Vestnik Moskovskogo universiteta, Seriya, Khimiya*, vol. 52, no. 4, pp. 243-276.

Об авторах

Семененко Евгений Владимирович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, evs_post@meta.ua.

Демченко Татьяна Дмитриевна, магистр, инженер отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, tanialitan9@gmail.com.

Рыжова Светлана Алексеевна, магистр, инженер отдела, управления динамическими проявлениями горного давления, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, evs_post@meta.ua.

About the authors

Semenenko Evgeniy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department of Mine Energy Complexes, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, evs_post@meta.ua

Demchenko Tatiana Dmitrievna, Master of Sciences (M.Sc.), Engineer in Department of Mine Energy Complexes, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, tanialitan9@gmail.com

Ryzhova Svetlana Alekseevna, Master of Sciences (M.Sc.), Engineer in Department of Pressure Dynamics Control in Rocks, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, evs_post@meta.ua

Анотація. У статті проаналізовано результати вітчизняних і зарубіжних фахівців, які досліджували в'язкість структурованих суспензій в залежності від концентрації твердої фази. Результати аналізу експериментальних даних дозволили обґрунтувати універсальну функцію для апроксимації залежності ефективної в'язкості структурованих суспензій від концентрації. У запропонованій функціональній залежності властивості твердої фази і хімічних реагентів, враховують величини коефіцієнта пропорційності і показника ступеня, які для водовугільних суспензій залежать від діаметра частинок. Отримані результати дозволяють науково обґрунтовано визначити величину гідравлічного ухилу і діаметра трубопроводу в залежності від витрати суспензії, що забезпечує адекватність проектувального і повірочного розрахунків гідротранспортних комплексів, що перекачують структуровані суспензії за даними про granulometric склад часток який транспортується.

Ключові слова: структурована суспензія, ефективна в'язкість, закон Бінгама-Шведова, концентрація, діаметр твердих частинок.

Annotation. The article analyzes findings of domestic and foreign experts who investigated viscosity of the structured suspensions depending on the concentration of the solid phase. Results of experimental data analysis allowed validating of a universal function for approximating dependence between effective viscosity of the structured suspensions and their concentration. In the proposed functional dependence between the properties of the solid phase and chemical reagents, values of the proportionality factor and exponent are taken into account, which for water-coal suspensions depend on the diameter of the particles. The obtained results make it possible to determine and scientifically validate rate of hydraulic slope and diameter of the pipeline depending on the flow rate of the slurry, hence ensuring adequacy of the design and verification calculations of the hydrotransporting complexes, which pump structured suspensions, by granulometric composition of the transported particles.

Keywords: structured suspension, effective viscosity, Bingham-Shvedov law, concentration, diameter of solid particles.

Статья поступила в редакцию 17.10.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Блюссом Б.А.