

УДК [622:531/533:65.011.8].001.3

Семененко Е.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
Рубан В.Д., магистр,
Подольяк К.К., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

Никифорова Н.А., канд. техн. наук, доцент
(Государственное ВУЗ «НМетАУ»)

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ
СТРУКТУРИРОВАННОЙ СУСПЕНЗИИ С РЕОЛОГИЧЕСКИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИМИ РАЦИОНАЛЬНОЕ
ГИДРОТРАНСПОРТИРОВАНИЕ**

Семененко Є.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.,
Рубан В.Д., магістр,
Подольяк К.К., магістр
(ІГТМ НАН України)

Никифорова Н.А., канд. техн. наук, доцент
(Державний ВНЗ «НМетАУ»)

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ
СТРУКТУРОВАНОЇ СУСПЕНЗІЇ З РЕОЛОГІЧНИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ РАЦІОНАЛЬНЕ
ГІДРОТРАНСПОРТУВАННЯ**

Semenenko Ye.V., Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Ruban V.D., M.S. (Tech.),
Podolyak K.K., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

Nikiforova N.A., Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(State HEI "NMetAU")

**MATHEMATICAL MODEL OF PROCESS OF STRUCTURED
SUSPENSION PREPARATION WITH RHEOLOGICAL PROPERTIES
WHICH ENSURE RATIONAL HYDROTRANSPORTATION**

Аннотация. Существенными проблемами для отечественных геотехнологических систем является снижение энергоемкости транспортирования полезного ископаемого и ресурсосбережение. Эти аспекты должны учитываться при разработке методов повышения эффективности технологий использования структурированных суспензий. Задачей процесса приготовления структурированных суспензий является получение из предоставленного твердого сыпучего материала и жидкой среды механической смеси с заданной концентрацией, физическими и реологическими свойствами. В данной работе поставлена и решена задача обоснования реологических параметров структурированных суспензий, обеспечивающих надежную доставку к потребителю твердого материала в требуемом количестве имеющимися в наличии насосами по существующему трубопроводу. При этом определяется значение концентрации суспензии, обеспечивающее совпадение рабочей точки рассматриваемой гидротранспортной

системы с регламентированным значением подачи.

Ключевые слова: структурированные суспензии, реологические характеристики, напорный гидротранспорт, математическое моделирование.

Актуальность данной работы определяется необходимостью повышения эффективности ведения горных работ на стадии проектных проработок технологий и предварительных расчетов. При этом наиболее актуальной проблемой для отечественных геотехнологических систем является снижение энергоемкости транспортирования полезного ископаемого и отходов переработки, а также ресурсосбережение и повышение экологической безопасности. Эти аспекты практически не рассматриваются в известных методиках расчета и технологиях приготовления структурированных суспензий (СС) [1 – 4], которые направлены на обоснование параметров нового оборудования с учетом свойств суспензии. Однако опыт модернизации установок гидротранспорта, перемещающих СС в геотехнологических системах [5], с целью повышения их эффективности указывает на рациональность другого подхода – изменение реологических характеристик (РХ) СС под существующее насосное оборудование и трубопроводы.

Целью настоящей работы является создание математической модели процесса получения суспензии, которую затем можно будет доставить потребителю в требуемом количестве по существующему трубопроводу имеющимися в наличии насосами.

Задачей процесса приготовления СС является получение из предоставленного твердого сыпучего материала и жидкой среды их механической смеси с заданной концентрацией, физическими и реологическими свойствами. Поэтому в первом приближении задача сводится к определению значения концентрации СС, которое обеспечивает совпадение рабочей точки рассматриваемой гидротранспортной системы с регламентированным значением подачи суспензии.

Для СС с характерными для геотехнологических систем реологическими свойствами, описываемыми законом Бингама-Шведова [1 – 4], зависимости начального касательного напряжения (НКН) и эффективной вязкости (ЭВ) от концентрации описываются экспоненциальной функцией [6, 7]

$$\tau_0 = K_\tau e^{aC'}, \quad (1)$$

$$\eta = K_\eta e^{bC'}, \quad (2)$$

где τ_0 – НКН в законе Бингама-Шведова [1 – 4]; η – ЭВ в законе Бингама-Шведова [1 – 4]; K_τ – коэффициент пропорциональности [6, 7]; a – показатель степени [6, 7]; e – основание натурального логарифма; K_η – коэффициент пропорциональности [6, 7]; b – показатель степени [6, 7]; C' – массовая доля твердой фазы в СС.

Гидравлический уклон будет определяться по следующим формулам

$$i = \mu_{\tau} e^{aC'} + \frac{Q}{\mu_Q} e^{bC'}, \quad (3)$$

$$\mu_{\tau} = \frac{8,02K_{\tau}}{\rho_0 g R}, \quad (4)$$

$$\mu_Q = \frac{\rho_0 g \pi R^4}{2,48K_{\eta}}, \quad (5)$$

$$C' = \frac{1}{1 + \frac{G}{Ar+1}}, \quad (6)$$

$$Ar = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}, \quad (7)$$

$$G = \frac{m_f}{m_s}, \quad (8)$$

где i – гидравлический уклон при течении СС по трубопроводу; Q – подача СС; Ar – параметр Архимеда; ρ_s – средневзвешенная плотность частиц твердой фазы; ρ_f – плотность жидкой фазы; g – ускорение свободного падения; R – радиус трубопровода; π – константа, равная 3,14; G – массовое соотношение фаз; m_f – масса жидкой фазы, использованная для приготовления СС; m_s – масса твердой фазы, использованная для приготовления СС.

С учетом выражений (1) – (8) расходно-напорная характеристика (РНХ) магистральной будет определяться по формуле [1, 5]

$$H_M = \left(\mu_{\tau} e^{aC'} + \frac{Q}{\mu_Q} e^{bC'} \right) k_Z L + \rho \Delta Z, \quad (9)$$

$$\rho = \frac{1}{1 - AC'}, \quad (10)$$

$$A = \frac{Ar}{1 + Ar}, \quad (11)$$

где H_M – потери напора в трубопроводе магистральной; k_z – коэффициент, учитывающий потери напора на местные гидравлические сопротивления; L – длина трубопровода; ρ – относительная плотность СС; ΔZ – геодезический подъем магистральной; a – показатель степени [6, 7]; e – основание натурального логарифма;

b – показатель степени [6, 7]; C' – массовая доля твердой фазы в СС; Q – подача СС; Ar – параметр Архимеда.

Согласно результатам ряда исследований [1 – 3], наиболее перспективными для гидротранспорта СС являются насосы центробежного типа, РНХ которых в рабочей области эксплуатации может быть представлена в следующем виде

$$H = K_H \frac{\gamma - \beta Q}{1 - AC'}, \quad (12)$$

где H – напор насоса; K_H – коэффициент пересчета РНХ насоса с воды на СС, равный 0,8092 [7]; γ – фиктивный напор насоса при нулевой подаче [8]; β – коэффициент снижения напора [8].

Комбинируя формулы (9) – (12), сводим задачу определения значения концентрации СС, которое обеспечивает совпадение рабочей точки рассматриваемой гидротранспортной системы с регламентированным значением подачи суспензии, к решению такого нелинейного уравнения

$$\frac{h - j_g}{1 - AC'} = \mu_\tau e^{aC'} + \frac{Q}{\mu_Q} e^{bC'}, \quad (13)$$

$$h = \frac{K_H}{k_Z L} (\gamma - \beta Q), \quad (14)$$

$$j_g = \frac{\Delta Z}{k_Z L}, \quad (15)$$

где h – погонный напор; j_g – геодезический уклон трассы.

Нетрудно показать, что при выполнении условия

$$h - j_g \leq \mu_\tau + \frac{Q}{\mu_Q} \quad (16)$$

уравнение (13) имеет единственный корень, который может быть найден только численными методами.

Под управлением реологическими характеристиками (РХ) СС понимается процесс изменения свойств твердой и жидкой фаз суспензии для получения начального касательного напряжения сдвига (НКН) и эффективной вязкости (ЭВ) в заданных диапазонах изменения. Этот процесс близок к процессу приготовления СС, однако процесс управления РХ больше ориентирован не на величину концентрации, а на изменение параметров зависимостей изменения РХ от концентрации в зависимости от свойств фаз.

С учетом уравнения (13) задача процесса управления РХ СС в общем случае записывается в следующем виде

$$\frac{\tilde{\gamma} - \tilde{\beta}Q}{1 - AC'} = \frac{8,02}{\rho_0 g R} \tau_0 + \frac{2,48Q}{\rho_0 g \pi R^4} \eta, \quad (17)$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{\gamma K_H - \Delta Z}{k_Z L}, \quad (18)$$

$$\tilde{\beta} = \frac{K_H}{k_Z L} \beta. \quad (19)$$

Формула (13) содержит данные о радиусе, геодезическом перепаде и длине трубопровода, параметрах РНХ насосов, величине плотности и подачи СС. Требуется выбрать значения величин τ и η , которые превращают выражение (17) в верное равенство.

Таким образом, для управления РХ СС необходимо рассмотреть соотношение между НКН и ЭВ

$$\tau_0 = \frac{0,309Q}{\pi R^3} (\eta^* - \eta), \quad (20)$$

$$\eta^* = \frac{\tilde{\gamma} - \tilde{\beta}Q}{1 - AC'} \frac{\rho_0 g \pi R^4}{2,48Q}, \quad (21)$$

где η^* – граничное фиктивное значение ЭВ.

Поскольку результаты численной обработки данных ряда исследований [6 – 8] указывают на следующую универсальную зависимость между НКН и ЭВ

$$\eta = A_\eta \tau_0^{E_\eta}, \quad (22)$$

где A_η – коэффициент пропорциональности, $A_\eta = 0.15$; E_η – показатель степени, $E_\eta = 0.65$.

С учетом зависимости (22) выражение (20) может быть преобразовано к следующему нелинейному уравнению

$$y^{E_\eta} + \theta y - 1 = 0, \quad (23)$$

$$y = E_\eta \sqrt[E_\eta]{A_\eta \frac{0,309Q}{\pi R^3} \tau_0}, \quad (24)$$

$$\theta = E_\eta \sqrt[E_\eta]{\frac{\pi R^3}{0,309QA_\eta} \tau_*^{\frac{1-E_\eta}{E_\eta}}}, \quad (25)$$

$$\tau_* = \frac{\tilde{\gamma} - \tilde{\beta}Q}{1 - AC'} \frac{\rho_0 g R}{8,03}, \quad (26)$$

где τ_* – граничное фиктивное значение НКН.

Уравнение (23) имеет единственный корень, существующий на промежутке $0 < y < 1$, зависимость которого от величины θ можно с инженерной точностью аппроксимировать следующей функцией (рис. 1)

$$y = 0,0088 \ln^2 \left(\frac{265}{\theta} \right). \quad (27)$$

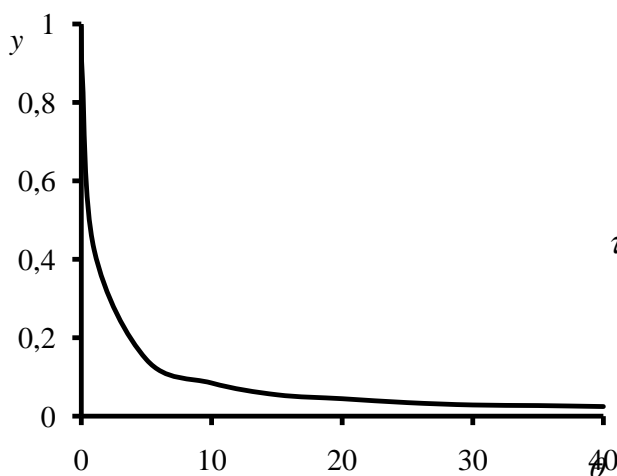


Рисунок 1 – Зависимость корня уравнения

(23) от величины θ при $E_\eta = 0,65$

С использованием зависимости (27) рациональные значения РХ СС будут определяться по формулам

$$\tau_0 = \left(\frac{\eta_*}{0,5} \right)^{1,54} \ln^2 \left(\left(\frac{Q}{0,9R^3} \right)^{0,65} \left(\frac{\eta_*}{0,5} \right)^{0,35} \right), \quad (28)$$

$$\eta = \frac{\eta_*}{15} \ln^{0,3} \left(\left(\frac{Q}{0,9R^3} \right)^{0,65} \left(\frac{\eta_*}{0,5} \right)^{0,35} \right). \quad (29)$$

Таким образом, использование формул (28), (29) и (21) дает возможность оценки требуемых реологических характеристик СС, которые позволят обеспечить доставку ее потребителю в требуемом количестве по существующему трубопроводу имеющимися в наличии насосами.

Выводы. Впервые для геотехнологических систем поставлена и решена задача управления процессом приготовления структурированных суспензий, обеспечивающая имеющимися в наличии насосами по существующему трубопроводу надежную доставку к потребителю твердого материала в требуемом количестве. Впервые обосновывается значение концентрации суспензии, которое обеспечивает совпадение рабочей точки рассматриваемой гидротранспортной системы с регламентированным значением подачи, что позволяет рассчитать требуемые для успешного гидротранспортирования значения реологических характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
2. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.
3. Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.

4. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.17.07 / В.И. Мурко– Новокузнецк: НГНПП Экотехника, 1999. – 289 с.

5. Семененко Е.В. Предельная концентрация водоугольных структурированных суспензий / Е.В. Семененко, В.Д. Рубан, К.К. Подоляк // „Збагачення корисних копалин”: Наук.-техн. зб. / ДВНЗ „Національний гірничий університет” – Дніпропетровськ, 2015: – Вип. 60 (101). – С. 44 – 51.

6. Семененко, Е.В. Учет параметров твердой фазы структурированных суспензий в формулах Освальда-Рейнера и Бингама-Шведова / Е.В. Семененко, Т.Д. Демченко // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2015. – № 123. – С. 186 – 193.

7. Семененко, Е.В. Зависимость реологических характеристик структурированных суспензий от свойств жидкой фазы / Е.В. Семененко, Т.Д. Демченко, С.А. Рыжова // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2015». – Т. 1. – С. 241 – 247.

8. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Евгений Владимирович Семененко. – Киев: Наукова думка, 2011. – 232 с.

REFERENCES

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

2. Svitliy, Yu.G. and Krut, O.A. (2010), *Gidravlichniy transport tverdih materialiv* [Hydraulic transport of solid materials], Shidniy vidavnicхий dim, Donetsk, Ukraine.

3. Svitliy, Yu.G. and Biletskiy, V.S. (2009), *Gidravlichniy transport* [Hydraulic transport], Shidniy vidavnicхий dim, Donetsk, Ukraine.

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. Semenenko, Ye.V., Ruban, V.D. and Podolyak, K.K. (2015), “Limiting concentration of water-coal structured suspensions”, *Zbagachennya korysnykh kopalyn*, no. 60 (101), pp. 44-51.

6. Semenenko, Ye.V. and Demchenko, T.D. (2015), “Accounting of solid phase parameters of structured suspensions in Oswald-Reiner and Bingham-Shvedov formulas”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 123, pp. 186-193.

7. Semenenko, Ye.V., Demchenko, T.D. and Rizhova, S.A. (2015), “Dependence of rheological characteristics of structured suspensions on liquid phase properties”, *Proc. of the International scientific conference “Forum of Mining Engineers”*, National Mining University, Dnepropetrovsk, pp. 241–247.

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

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, Днепр, Украина, evs_igtm@mail.ru.

Рубан Виталий Дмитриевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина, igtm-ruban@i.ua.

Подоляк Константин Константинович, магистр, инженер в отделе проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины, Днепр, Украина, podolyak@mail.ua.

Никифорова Нина Анатольевна, кандидат технических наук, доцент, доцент на кафедре теории металлургических процессов и общей химии, Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, Украина, ninanik@ua.fm.

About the authors

Semenenko Yevgeniy Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences (D. Scio), Senior Researcher, Head of Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, evs_igtm@mail.ru.

Ruban Vitaliy Dmitrievich, Master of Sciences (M.Sc.), Junior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, igtm-ruban@i.ua.

Podolyak Konstantin Konstantinovich, Master of Sciences (M.Sc.), Engineer at the Department of

Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, podolyak@mail.ua.

Nikiforova Nina Anatolevna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor at the Department of Theory of Metallurgical Processes and General Chemistry, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepr, Ukraine, ninamik@ua.fm.

Анотація. Суттєвими проблемами для вітчизняних геотехнологічних систем є зниження енергоємності транспортування корисних копалин і ресурсозбереження. Ці аспекти повинні враховуватися при розробці методів підвищення ефективності технологій використання структурованих суспензій. Завданням процесу приготування структурованих суспензій є отримання з наданого твердого й сипучого матеріалу та рідкого середовища механічної суміші із заданою концентрацією, фізичними та реологічними властивостями. У даній роботі поставлено й розв'язано задачу обґрунтування реологічних параметрів структурованих суспензій, які забезпечують надійну доставку до споживача твердого матеріалу в необхідній кількості наявними насосами по існуючих трубопроводах. При цьому визначається значення концентрації суспензії, яке забезпечує збіг робочої точки гідротранспортної системи, що розглядається, з регламентованим значенням подачі.

Ключові слова: структуровані суспензії, реологічні характеристики, напірний гідротранспорт, математичне моделювання.

Abstract. Significant problems for local geotechnical systems are reducing of energy intensity of the mineral transportation and resource conservation. These aspects must be taken into account when elaborating methods for improving technological effectiveness of structured suspension usage. Purpose of process of structured suspension preparation is to obtain a mechanical mixture with a predetermined concentration and physical and rheological properties from particulate solid material and fluid. Objective of this work was to validate rheological parameters of structured suspensions which ensured reliable delivery of solids to the consumer in the required amount by available pumps through existing pipelines, and this problem was solved. The offered method allows to determine such suspension concentration value, which ensures coincidence of concerned system operating point with the scheduled feeding value.

Keywords: structured suspension, rheological characteristics, pressure hydrotransport, mathematical simulation.

Стаття постуила в редакцію 04.10.2016

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