

УДК [621.671:621.65.035:622.012.2].001.24

Семененко Е.В., д-р техн. наук, ст. науч. сотр.
(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

Скосырев В.Г., канд. техн. наук, доцент,
(ПГТУ МОН Украины)

Киричко С.Н., канд. техн. наук,
Демченко Т.Д., магистр

(ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)

РАСЧЕТ КРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСОВ, ПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ ГИДРОСМЕСИ ВЫСОКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Семененко Є.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.
(ИГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

Скосирев В.Г., канд. техн. наук, доцент
(ПДТУ МОН України)

Киричко С.М., канд. техн. наук,
Демченко Т.Д., магістр

(ИГТМ ім. М.С. Полякова НАН України)

РОЗРАХУНОК КРИТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІДЦЕНТРОВИХ НАСОСІВ, ЩО ПЕРЕКАЧУЮТЬ ГИДРОСУМІШІ ВИСОКОЇ КОНЦЕНТРАЦІЇ

Semenenko Ye..V., D. Sc. (Tech.), Senior Researcher
(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

Skosyrev V.G., Ph.D. (Tech), Associate Professor
(PSTU MES of Ukraine)

Kirichko S.N., Ph.D. (Tech),

Demchenko T.D., M.S (Tech.)

(N.S. Polyakov IGTM NAS of Ukraine)

CALCULATION OF CRITICAL PARAMETERS OF CENTRIFUGAL PUMPS DESIGNED FOR HIGHLY-CONCENTRATED HYDROMIXTURE

Аннотация. Целью исследования является изучение влияния начального напряжения сдвига гидросмесей высокой концентрации на параметры расходно-напорных характеристик центробежных насосов гидротранспортных комплексов ГОКов в зависимости от других реологических свойств и концентрации суспензии, а также характеристик частиц твердой фазы. В статье впервые установлено существование критической частоты вращения рабочего колеса центробежного насоса, при вращении ниже которой насосный агрегат не способен перекачивать гидросмеси высокой концентрации, относящиеся к жидкостям Бингама-Шведова. Установлена зависимость этой критической частоты вращения от диаметра рабочего колеса, реологических свойств и концентрации гидросмеси, а также от плотности частиц твердой фазы гидросмеси.

Показано, что, при определенном соотношении реологических характеристик гидросмеси и параметра Архимеда частиц твердой фракции, зависимость данной частоты вращения от концентрации гидросмеси носит экстремальный характер. Доказано, что в интервалах изменения параметров центробежных насосов гидротранспортных комплексов, характерных для отечественных ГОКов, рассматриваемый экстремум является минимумом.

Ключевые слова: гидротранспорт, центробежный насос, гидросмесь, высокая концентрация.

Гидротранспортные комплексы широко используются на отечественных ГОКах для перемещения россыпей от мест добычи к месту переработки, а также для отведения отходов обогащения в хранилища. Затраты на эксплуатацию этих трубопроводных установок составляют существенную часть в себестоимости переработки минерального сырья, и в основном они формируются из стоимости электрической энергии, потребляемой центробежными насосами (ЦН), осуществляющими перекачивание гидросмесей, и стоимости технической воды [1, 2]. Поэтому, одним из перспективных направлений снижения энергоемкости гидротранспортных комплексов является повышение концентрации перекачиваемых гидросмесей до значений, при которых проявляются реологические свойства суспензий [3]. Традиционно в этом случае гидротранспортные установки комплектуются поршневыми насосами, что предполагает значительные капитальные затраты, обусловленные демонтажем ЦН и переоборудованием существующих насосных станций под насосы другого типа. Этим капитальным затратам можно было бы избежать если продолжать использовать после повышения концентрации для транспортирования гидросмесей ЦН. Ограниченный отечественный опыт указывает на возможность такого применения для систем транспортировки водоугольного топлива [3-7], однако такое проектное решение в условиях ГОКов требует научно обоснованных методов пересчета расходно-напорных характеристик (РНХ) ЦН при их использовании на гидросмесях высокой концентрации (ГВК).

При определении РНХ ЦН, перекачивающих ГВК, необходимо учитывать три одновременно действующих фактора [1]: повышение плотности перекачиваемой жидкости; изменение вязкости суспензии; проявление вязкопластических свойств среды, в виде начального напряжения сдвига (НКН). Влияние фактора повышения плотности перекачиваемой жидкости подробно изучено в ряде публикаций, посвященных использованию ЦН для перекачивания водоугольного топлива и гидросмесей различной природы [1 – 7]. Учет этого влияния осуществляется введением коэффициента, пропорционального относительной плотности перекачиваемой пульпы. Известно несколько основных методов пересчета РНХ ЦН с воды на суспензию высокой вязкости [2, 8, 9]. Метод А.И. Степанова заключается в том, что на графиках по линиям абсцисс в логарифмической шкале откладывают число Рейнольдса, а по линии ординат – поправочные коэффициенты. На эту же диаграмму наносят кривые КПД насосов при работе на воде и на вязкой жидкости. Метод М.Д. Айзенштайна основан на учете влияния

геометрии рабочего колеса, для чего при вычислении эквивалентного диаметра используется число лопаток рабочего колеса, их толщина, ширина и шаг по внешнему диаметру. Метод А.И. Суханова предусматривает учет геометрического и кинематического подобия потоков в насосах при равных числах Рейнольдса. Однако исследования влияния фактора проявления вязкопластических свойств среды, в виде НКН, на РНХ ЦН для гидросмесей, транспортируемых по магистралям ГОКов не известны. Влияние этого фактора на РНХ ЦН изучено мало. Не в последнюю очередь это объясняется тем, что насосы этого типа до начала XXI практически не применялись для перекачивания сред проявляющих вязкопластические свойства. Влияние НКН на РНХ магистрали отмечается в исследованиях специалистов ИГМ НАН Украины [2], а также в обобщении опыта работы трубопровода Белово-Новосибирск [4 – 7]. Но эти результаты не затрагивают влияние НКН на РНХ насосов, но позволяют обобщить полученные результаты и адаптировать их для рассматриваемого случая.

Целью исследования является изучения влияния НКН ГВС на параметры РНХ ЦН гидротранспортных комплексов ГОКов в зависимости от реологических свойств и концентрации суспензии, а также характеристик частиц твердой фазы.

Наиболее значительным появлением вязкопластических свойств ГVK является необходимость создать между начальным и конечным сечениями трубопровода некоторый перепад давления, прежде чем начнется течение. Величина этого перепада определяется НКН транспортируемой суспензии и при меньших давлениях рассматриваемая ГVK ведет себя как твердое, упругое тело [1, 2]:

$$\Delta P > 1,15 \frac{4\tau_0 L}{D}, \quad (1)$$

где ΔP – разница давлений на входе и выходе из канала; τ_0 – НКН рассматриваемой ГVK; L – длина канала; D – характерный геометрический размер поперечного сечения канала.

В этом отношении проточные каналы рабочего колеса ЦН не являются исключением, только необходимый перепад давления в них создается центробежными силами, возникающими при его вращении, которое обеспечивается электродвигателем. Этим же вращением создается напор ЦН. Известно, что частота вращения рабочего колеса ЦН определяет его РНХ, то есть зависимости напора, мощности и КПД от расхода. Кроме того, изменение частоты вращения рабочего колеса считается одним из перспективных методов управления ЦН, а наиболее часто используемые коэффициенты пересчета РНХ ЦН прежде всего являются степенными функциями от соотношения частот вращения рабочего колеса в различных режимах [1]:

$$k_Q = \frac{Q}{Q_0}, \quad k_H = \frac{H}{H_0}, \quad k_N = \frac{N}{N_0}, \quad (2)$$

$$k_Q = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad k_H = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2, \quad k_N = \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^3, \quad (3)$$

где H – напор насоса при работе на суспензии с большей вязкостью; H_0 – напор насоса при работе на воде; Q – подача насоса при работе на суспензии с большей вязкостью; Q_0 – подача насоса при работе на воде; ω – частота вращения рабочего колеса насоса при работе на суспензии с большей вязкостью; ω_0 – частота вращения рабочего колеса насоса при работе на воде; N – мощность на валу ЦН при работе на суспензии с большей вязкостью; N_0 – мощность на валу ЦН при работе на воде; k_Q – коэффициент пересчета подачи насоса; k_H – коэффициент пересчета напора насоса; k_N – коэффициент пересчета мощности на валу насоса.

Для успешной работы ЦН на ГВК, необходимо, что бы перепад давления, создаваемый центробежными силами, на входе в рабочее колесо удовлетворял условию (1). Учитывая, что длина проточного канала рабочего колеса ЦН, сравнима с величиной $L = R - R_0$, то на единицу его длины приходится следующий перепад давления [1, 8, 9]:

$$\frac{\Delta P}{L} = \rho \omega^2 \bar{R}, \quad \bar{R} = \frac{R + R_0}{2}, \quad (4)$$

где ρ – плотность суспензии; R – наружный радиус рабочего колеса; R_0 – внутренний радиус рабочего колеса; \bar{R} – средний радиус рабочего колеса.

Характерный геометрический размер поперечного сечения канала рабочего колеса ЦН, входящий в зависимость (1), можно определить с учетом количества лопаток и их толщины на входе в насос:

$$D = \sqrt{\beta \theta - s} r R, \quad (5)$$

$$s = \frac{\sigma}{R_0}, \quad \beta = \frac{b}{R_0}, \quad \theta = \frac{2\pi}{z}, \quad r = \frac{R_0}{R},$$

где b – ширина канала рабочего колеса; z – число лопаток рабочего колеса; σ – толщина лопатки.

Подставляя выражения (4) и (5) в условие (1), после несложных преобразований получим следующее ограничение на частоту вращения рабочего колеса:

$$\omega > \omega_{kp}, \quad (6)$$

$$\omega_{kp} = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho R^2}} \phi, \quad (7)$$

$$\phi = \frac{3}{\sqrt{\Phi}}, \quad \Phi = r \sqrt{1 + r \sqrt{\psi\beta\theta}}, \quad \psi = 1 - \frac{s}{\theta},$$

где ω_{kp} – критическая частота вращения рабочего колеса насоса; Φ – конструктивный параметр (рис. 1); ϕ – коэффициент, учитывающий геометрические характеристики и конструктивные особенности рабочего колеса ЦН (рис. 2).

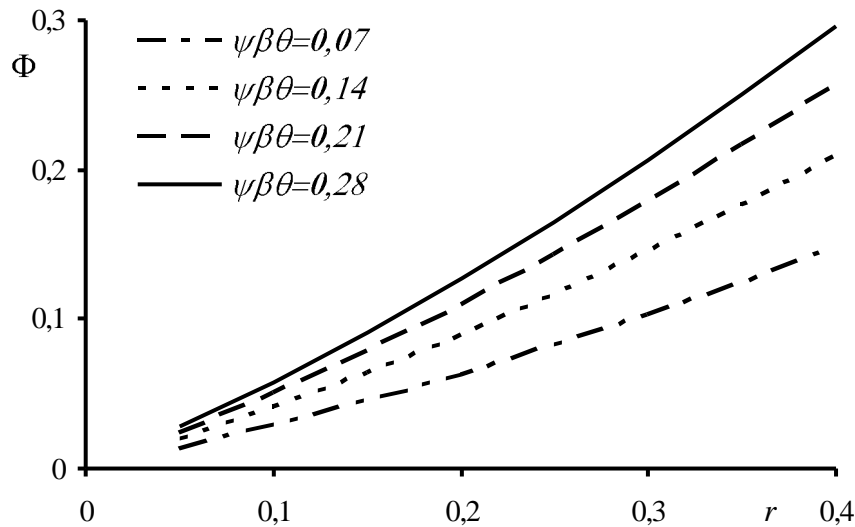


Рисунок 1 – Зависимость конструктивного параметра от отношений радиусов рабочего колеса ЦН при различных его геометрических характеристиках

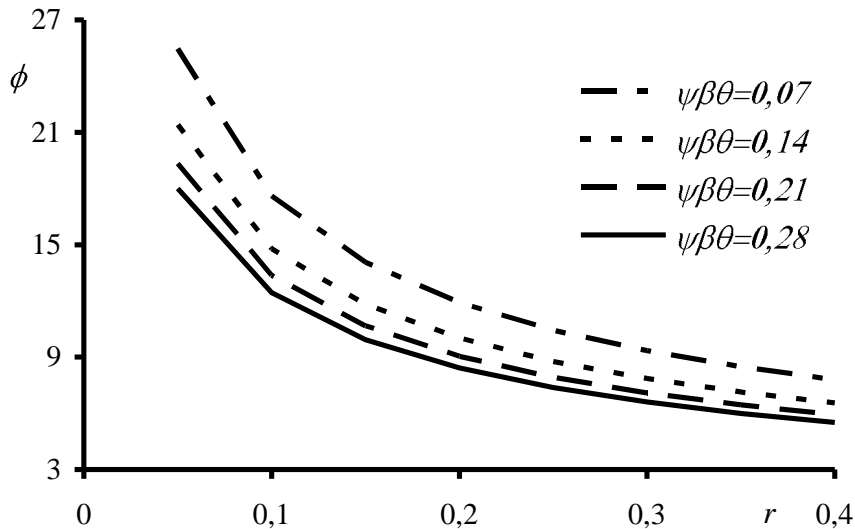


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента ϕ от отношений радиусов рабочего колеса ЦН при различных его геометрических характеристиках

В формуле (7) коэффициент ϕ учитывает геометрические характеристики и конструктивные особенности рабочего колеса ЦН (рис. 2), в то время как подкоренное выражение первого сомножителя зависит от плотности твердых

частиц, а также от концентрации и реологических свойств суспензии. Учитывая известные зависимости для плотности и НКН ГVK [1]:

$$\rho = \rho_w (1 + ArC), \quad \tau_0 = K_\tau e^{mC}, \quad Ar = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w},$$

формулу (7) можно представить в следующем виде:

$$\omega_{kp} = \sqrt{\frac{K_\tau}{\rho_w R^2}} \phi W, \quad W = \frac{e^{0,5mC}}{\sqrt{1 + ArC}}, \quad (8)$$

где C – массовая концентрация гидросмеси; Ar – параметр Архимеда частиц твердой фазы; ρ_s – средневзвешенная плотность частиц твердой фазы; ρ_w – плотность жидкой фазы; W – коэффициент, учитывающий концентрацию ГVK (рис. 3, 4).

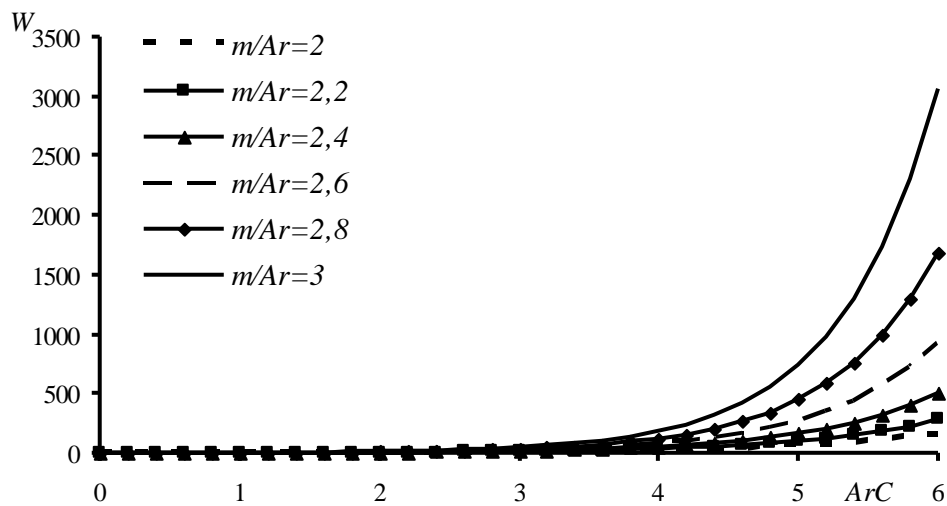


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента W от концентрации ГVK при различной плотности твердых частиц

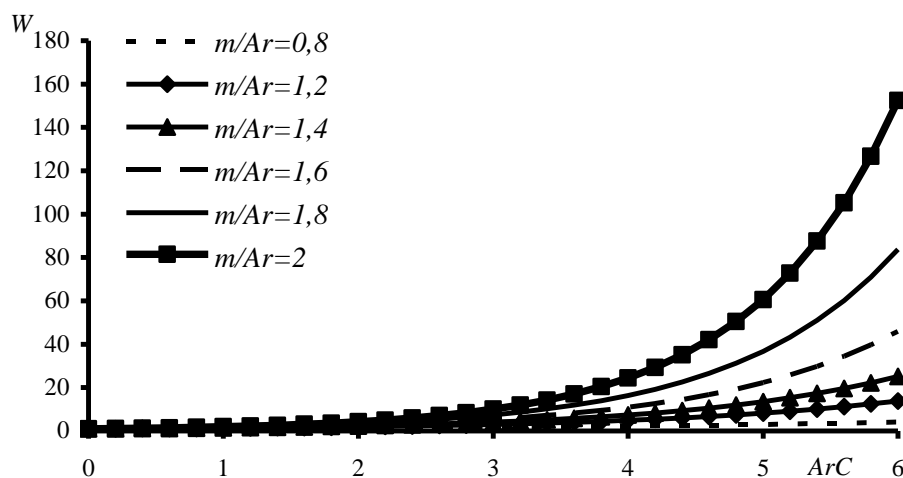


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента W от концентрации ГVK при различной плотности твердых частиц

Результаты анализа формулы для расчета величины W указывают, что в случае когда $m < Ar$, зависимость этого коэффициента от концентрации имеет минимум

$$\omega_e^{kp} = \sqrt{\frac{K_\tau}{\rho_w R^2}} \phi w, \quad c = \frac{1}{m} - \frac{1}{Ar}, \quad w = \sqrt{\frac{m}{Ar}} e^{0,5 \left(1 - \frac{m}{Ar}\right)},$$

где ω_e^{kp} – минимальное значение критической частоты вращения рабочего колеса ЦН при перекачивании ГВК; w – коэффициент, учитывающий зависимость величины ω_e^{kp} от реологических параметров и плотности твердых частиц (рис. 5); c – концентрация суспензии при которой реализуется минимум (рис. 6).

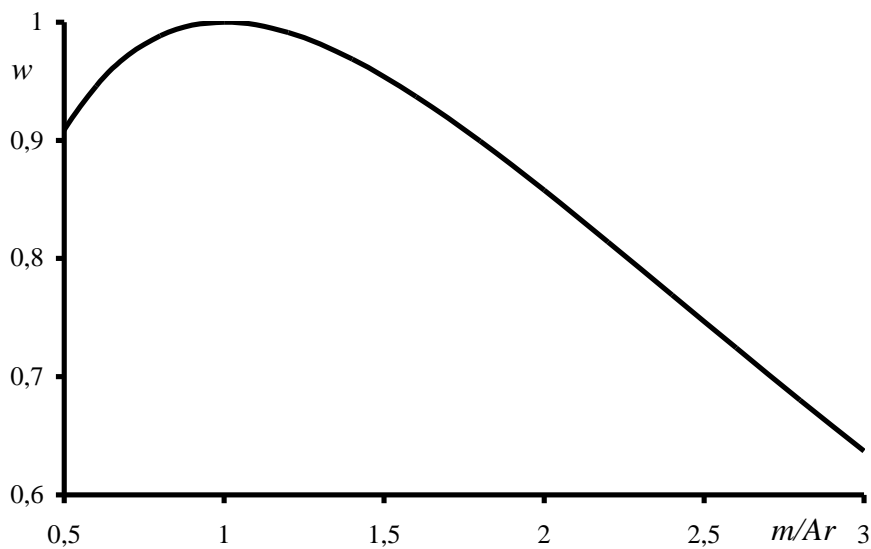


Рисунок 5 – Зависимость коэффициента w от плотности твердых частиц

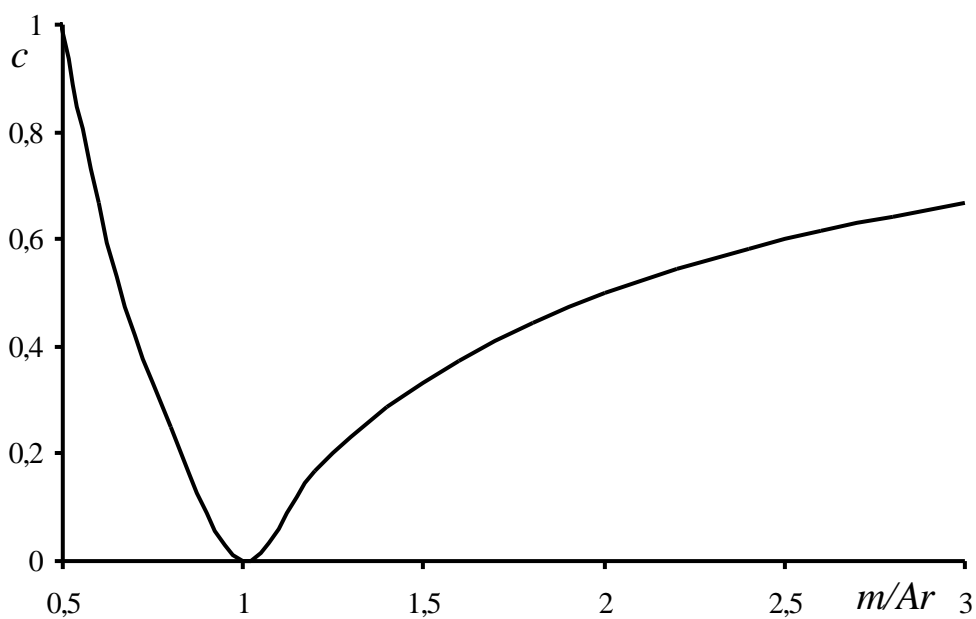


Рисунок 6 – Зависимость концентрации c от плотности твердых частиц

Из формул (5) – (7) видно, что выполнение условия (6), в случае если регламентированная частота вращения рабочего колеса меньше критической, возможно только за счет изменения концентрации гидросмеси, или за счет снижения величины НКН путем добавления реагентов [3 – 7].

Совместное рассмотрение формул (6) и (8) приводит к следующему не линейному неравенству для определения требуемой концентрации суспензии:

$$1 + ArC > Be^{mC}, \quad B = \frac{9K_{\tau}}{\Phi\rho_w\omega_p^2R^2},$$

а разрешение неравенства (6) относительно τ_0 позволяет получить требуемое значение НКН суспензии в явном виде:

$$\tau_0 < \frac{\Phi\rho\omega_p^2R^2}{9},$$

где ω_p – регламентируемая частота вращения рабочего колеса.

Выводы: Впервые установлено существование критической частоты вращения рабочего колеса ЦН, при вращении ниже которой насосный агрегат не способен перекачивать ГВК, относящиеся к жидкостям Бингама-Шведова. Установлена зависимость этой критической частоты вращения от диаметра рабочего колеса, реологических свойств и концентрации гидросмеси, а также от плотности частиц твердой фазы гидросмеси. Показано, что, при определенном соотношении реологических характеристик и параметра Архимеда частиц твердой фракции, зависимость данной частоты вращения от концентрации гидросмеси носит экстремальный характер. Доказано, что в интервалах изменения параметров ЦН гидротранспортных комплексов, характерных для отечественных ГОКов, рассматриваемый экстремум является минимумом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Киричко, С.М. Обґрунтування параметрів процесів гідромеханізації гірничих робіт при виконанні гідросумішей високої концентрації: дис... канд. техн. наук: 05.15.09: захищена 25.03.16: затв. 12.05.16 / Киричко С.М. – Дніпропетровськ: ПТМ НАНУ, 2016. – 205с.

2 Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титанцирконовых россыпей / Е.В. Семененко. – К.: Наукова думка, 2011. – 232 с.

3 Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.

4 Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.

5 Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт / Ю.Г. Світлий, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. – 436 с.

6 Світлий, Ю.Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О.А. Круть. – Донецьк.: Східний видавничий дім, 2010. – 268 с.

7 Круть, А.А. Исследование рабочего процесса поршневого насоса на водоугольном топливе / А.А. Круть, Н.Б. Трейнер // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 57. – С. 193 – 199.

8 Животовский, Л.С. Техническая механика гидросмесей и грунтовые насосы / Л.С. Животовский, Л.А. Смойловская.– М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.

9 Дмитриев, Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.

REFERENCES

1 Kirichko, S.M.(2016). “Substantiation of mining hydraulic mechanization processes parameters using highly concentrated hydraulic mixtures”, Abstract of Ph.D. dissertation, Geotechnical and mining mechanics, M.S. Poljakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

2 Semenenko, Ye.V. (2011), *Nauchnyie osnovyie tehnologii gidromehanizatsii otkryitoy razrabotki titan-tsirkonovyih rossyipey* [The scientific basis of the technologies of hydromechanization of open development of titanium-zirconium placers], Naukova Dumka, Kiev, Ukraine.

3 Smoldyirev, A.E. and Safonov, Yu.K. (1989), *Truboprovodnyiy transport kontsentrirrovannyih gidrosmesey* [Pipeline transportation of concentrated slurries], Mashinostroenie, Moscow, SU.

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

5 Svitliy, Yu.G. and Biletskiy, V.S. (2009), *Gidravlichniy transport* [Hydraulic transport], Skhidniy vidavnichiy dim, Donetsk, Ukraine.

6 SvItliy, Yu.G. and Krut, O.A. (2010), *Gidravlichniy transport tverdykh materialiv* [Hydraulic transport of solid materials], Skhidniy vidavnichiy dim, Donetsk, Ukraine.

7 Krut, A.A. and Treyne, N.B. (2005), “Investigation of the working process of a piston pump on water-coal fuel”, *Geo-Technical Mechanics*, no. 57, pp. 193-199.

8 Zhivotovskiy, L.S. and Smoylovskaya, L.A. (1986), *Tekhnicheskaya mekhanika gidrosmesey i gruntovyie nasosyi* [Technical mechanics of slurry and ground pumps], Mashinostroenie, Moscow, SU.

9 Dmitriev, G.P., Maharadze, L.I. and Gochitashvili, T.Sh. (1991), *Napornyye gidrotransportnyie sistemy* [Pressurized hydrotransport systems], Nedra, Moscow, SU.

Об авторах

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

Скосырев Виктор Георгиевич, кандидат технических наук, доцент на кафедре электрификации промышленных предприятий, Приазовский государственный технический университет (ПГТУ) Министерства образования и науки Украины, Мариуполь, Украина, evs_post@meta.ua

Киричко Сергей Николаевич, кандидат технических наук, младший научный сотрудник в отделе геодинамических систем и вибрационных технологий, Институт геотехнической механики им. М.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепр, Украина, evs_post@meta.ua

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

About the authors

Semenenko Evgeniy Vldimirovich, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of the Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, evs_post@meta.ua

Skosyrev Viktor Georgievich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor in the Department of Electrification of Industrial Enterprises, Priazovsky State Technical University (PSTU) under the Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, Ukraine, e-mail. evs_post@meta.ua

Kirichko Sergey Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher in the Department of Geodynamic systems and Vibration Technologies, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, evs_post@meta.ua

Demchenko Tatiana Dmitrievna, Master of Science, Engineer in the Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, tanialitan9@gmail.com

Анотація. Метою дослідження є вивчення впливу початкової напруги зсуву гідросумішей високої концентрації на параметри витратно-напірних характеристик відцентрових насосів гідротранспортних комплексів ГЗК в залежності від інших реологічних властивостей і концентрації суспензії, а також характеристик частинок твердої фази. У статті вперше встановлено існування критичної частоти обертання робочого колеса відцентрового насоса, при обертанні нижче якої насосний агрегат не здатний перекачувати гідросуміші високої концентрації, що відносяться до рідин Бінгама-Шведова. Встановлено залежність цієї критичної частоти обертання від діаметра робочого колеса, реологічних властивостей і концентрації гідросуміші, а також від щільності частинок твердої фази гідросуміші. Показано, що, при певному співвідношенні реологічних характеристик гідросуміші і параметра Архімеда частинок твердої фракції, залежність даної частоти обертання від концентрації гідросуміші носить екстремальний характер. Доведено, що в інтервалах зміни параметрів відцентрових насосів гідротранспортних комплексів, характерних для вітчизняних ГЗК, що розглядається екстремум є мінімумом.

Ключові слова: гідротранспорт, відцентровий насос, гідросуміш, висока концентрація.

Annotation. Purpose of the research is to study influence of initial shear stress of highly-concentrated slurry on the parameters of discharge-head characteristics of centrifugal pumps in hydrotransport complexes of ore-dressing and processing enterprises depending on other rheological properties and concentration of the suspension, as well as characteristics of particles of the solid phase. It is for the first time when existence of critical rate of impeller rotation speed in the centrifugal pump is determined, below which the pump, while rotating, will be unable to pump highly-concentrated slurries, which refer to the Bingham-Shvedov fluids. Dependence is determined between this critical rotation frequency and impeller diameter, rheological properties and concentration of the slurry, as well as density of the particles of the slurry solid phase.

It is shown that, at certain ratio between rheological characteristics of slurry and Archimedes parameter of solid fraction particles, dependence of this rotation frequency on the concentration of the slurry is an extreme factor. It is proved that within intervals of variation of centrifugal pump parameters in hydrotransport complexes, which are characteristic for domestic ore-dressing and processing enterprises, the extremum under consideration is a minimum.

Keywords: hydrotransport, centrifugal pump, slurry, high concentration.

Стаття поступила в редакцію 30.11.2017

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Б.А. Блюссом