DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330

Электромеханика и машиностроение

УДК 622.648.2

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ НА КАЧКАНАРСКОМ ГОКе

В.И.АЛЕКСАНДРОВ [1], С.А.ТИМУХИН [2], П.Н.МАХАРАТКИН [1]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия*

В статье приведены аналитические расчеты удельных потерь напора при гидравлическом транспортировании гидросмесей хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа при складировании хвостов обогащения в хвостохранилище. Расчеты выполнены по результатам экспериментальных исследований зависимости удельных потерь напора от шероховатости внутренней поверхности трубопроводов, футерованных полиуретановым покрытием. В процессе экспериментального определения шероховатости полиуретановых покрытий трубопроводов установлено, что величина физической шероховатости покрытий более, чем в четыре раза меньше шероховатости стальных трубопроводов, что приводит к снижению коэффициентов гидравлических сопротивлений, входящих в расчетную формулу удельных потерь напора – формулу Дарси – Вейсбаха. Рассчитаны коэффициенты относительной и эквивалентной шероховатостей для трубопроводов с покрытием и без покрытия. Сравнительные расчеты показали, что применение полиуретановых покрытий гидротранспортных трубопроводов способствует снижению удельной энергии при гидравлическом транспортировании хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа в 1,5 раза. Для оценки характера и интенсивности изменения физической шероховатости опытных образцов труб с полиуретановым покрытием были выполнены эксперименты по наработке шероховатости на лабораторном гидравлическом стенде. Подготовленная гидросмесь хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа прокачивалась по кольцевому трубопроводу, в линейной части которого были установлены последовательно три опытных образца труб с покрытием. Эксперименты показали, что шероховатость после наработки 484 ч на всех образцах трубопроводов изменяется незначительно. Значения шероховатости находятся в интервале от 0,814 до 0,862 мкм. В результате обработки экспериментальных данных методами математической статистики получена эмпирическая формула для расчета наработанной шероховатости поверхности полиуретанового покрытия в зависимости от времени работы трубопровода на гидросмеси хвостов обогащения железной руды.

***Ключевые слова*:** шероховатость, коэффициент гидравлических сопротивлений, эквивалентная шероховатость, гранулометрический состав, гидросмесь, удельные потери напора

***Как цитировать эту статью*:** Александров В.И. Энергетическая эффективность гидравлического транспорта хвостов обогащения железной руды на Качканарском ГОКе / В.И.Александров, С.А.Тимухин, П.Н.Махараткин // Записки Горного института. 2017. Т. 225. С. 330-337. DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330

Введение. Одним из важных направлений интенсификации горно-рудного производства, повышения его эффективности и конкурентоспособности в условиях современных рыночных отношений является создание мощной транспортной базы, способной значительно повысить производительность транспортных систем при одновременном снижении себестоимости транспортных перевозок минерального сырья и продуктов его переработки. Развитие такой базы связано с внедрением непрерывных видов транспорта, среди которых наибольшее распространение в горной отрасли получил гидравлический трубопроводный транспорт.

В настоящее время в горно-рудном промышленном комплексе функционирует около 400 напорных гидротранспортных систем, суммарная длина трубопроводной магистрали которых превышает 1300 км. Этими системами ежегодно перемещается более 1,5 млрд т различных твердых сыпучих материалов, в основном хвостов обогащения минерального сырья и концентратов.

АО «ЕВРАЗ КГОК» входит в пятерку крупнейших в России горно-рудных предприятий. Производственная мощность комбината составляет более 55 млн т железной руды в год. Основным потребителем продукции ЕВРАЗ КГОКа является ЕВРАЗ НТМК. ЕВРАЗ КГОК добывает руду из трех карьеров с дальнейшей ее переработкой в цехах дробления, обогащения, агломерации и окускования.

Анализ работы гидротранспортных систем на горных предприятиях показывает, что эффективность использования этого вида транспорта не соответствует его техническим возможностям, высоки трудоемкость работ при эксплуатации оборудования, гидроабразивный износ трубопроводов, металлоемкость и энергоемкость гидротранспортных систем.

DOI: *10.18454/PMI.2017.3.330*

Удельная энергоемкость гидравлического транспорта зависит от удельных потерь напора и концентрации твердой фазы гидросмеси [3]:

$$E = \frac{N}{q_{тв} L} = \frac{\rho_{см} g I_{см}}{3{,}6 \rho_{тв} c_{об}}, \quad (1)$$

где E – удельная энергоемкость процесса, кВт·ч/(т·км); N – мощность насосов, кВт; $q_{тв}$ – производительность системы по твердому материалу, т/ч; L – длина трубопровода (расстояние транспортирования), км; $\rho_{см}$ – плотность гидросмеси, т/м^3; $\rho_{тв}$ – плотность твердых хвостов, т/м^3; g – ускорение силы тяжести, м/с^2; $I_{см}$ – удельные потери напора, м вод.ст/м; $c_{об}$ – объемная концентрация твердых частиц в гидросмеси.

Из формулы (1) видно, энергоемкость процесса транспортирования в основном зависит от удельных потерь напора $I_{см}$ при транспортировании гидросмеси (хвостовой пульпы) по трубопроводу и от величины концентрации $c_{об}$ твердой фазы в транспортируемом потоке гидросмеси. Снижение потерь напора и увеличение концентрации приводят к уменьшению работы на перекачку заданного объема твердого материала – хвостов обогащения.

Известно, что основные потери энергии при трубопроводном транспортировании жидкостей расходуются на преодоление сил трения потока жидкости о внутренние поверхности трубопровода, и зависят от величины коэффициента гидравлических сопротивлений λ, входящего в формулу Дарси – Вейсбаха [5],

$$I = \lambda \frac{v^2}{2gD}, \quad (2)$$

где v – скорость потока жидкости, м/с; D – диаметр трубопровода, м.

Коэффициент гидравлических сопротивлений является функцией относительной шероховатости стенок трубы и числа Рейнольдса [6, 7], определяющего режим течения жидкости, т.е.

$$\lambda = f(\varepsilon, \mathrm{Re}), \quad (3)$$

где $\varepsilon = \Delta/D$ – относительная шероховатость стенок трубопровода; Δ – абсолютная (физическая) шероховатость стенок трубы, мкм; $\mathrm{Re} = vD\rho/\mu$ – число Рейнольдса; ρ – плотность жидкости, кг/м^3; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с.

Из формул (2) и (3) следует, что путем изменения физической шероховатости стенок трубопровода можно влиять на величину удельных потерь напора при гидравлическом транспортировании жидкостей, в том числе и гидросмесей хвостов обогащения руд.

Коэффициент гидравлических сопротивлений и режимы течения. При ламинарном режиме течения жидкостей ($\mathrm{Re} \le 2300$) коэффициент гидравлических сопротивлений не зависит от шероховатости стенок, а определяется только величиной числа Рейнольдса по формуле Стокса [6, 7]

$$\lambda = \frac{64}{\mathrm{Re}}. \quad (4)$$

В зоне трения, характерной для гидравлически гладких труб (высота неровностей покрыта пленкой жидкости), коэффициент гидравлических сопротивлений также не зависит от шероховатости стенок. Такой режим течения происходит при числах Рейнольдса в диапазоне $2300 < \mathrm{Re} \le 100000$. Коэффициент λ рассчитывается по формуле Блазиуса

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{\mathrm{Re}^{0{,}25}}. \quad (5)$$

Практически все гидротранспортные трубопроводы работают на режимах переходных к турбулентному и в турбулентном режиме, когда определяющее значение на величину гидравлических сопротивлений оказывает величина шероховатости стенок трубопровода [8, 12].

Рассчитаем величину числа Рейнольдса для условий Качканарского ГОКа по формуле

$$\mathrm{Re} = \frac{vD\rho_{см}}{\mu}. \quad (6)$$

Зададим следующие значения величин: $D = 1000$ мм; $v = 4{,}8$ м/с; $\rho_{см} = c_{об}(\rho_{тв} - 1) + 1 = 1092$ кг/м^3; $\mu = 1{,}017$ Па·с.

В расчете принято, что массовая концентрация гидросмеси хвостов обогащения $c_р = 10$ %, что соответствует $c_{об} \cong 3$ %, по формуле $c_{об} = c_р \dfrac{\rho_{см}}{\rho_{тв}} = 0{,}1 \cdot \dfrac{1092}{3300} = 0{,}033$.

Для трубопровода $D = 1000$ мм число Рейнольдса

$$\mathrm{Re} = \frac{4{,}8 \cdot 1{,}0 \cdot 1092}{1{,}017 \cdot 10^{-3}} = 5{,}154 \cdot 10^6.$$

Для трубопровода $D = 900$ мм, средней скорости $v = 4{,}0$ м/с и аналогичных параметров пульпы число Рейнольдса будет равно

$$\mathrm{Re} = \frac{4{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 1092}{1{,}017 \cdot 10^{-3}} = 3{,}865 \cdot 10^6.$$

Фактически получаем, что режим течения пульпы в трубопроводах – развитый турбулентный. При развитом турбулентном режиме (квадратичная зона трения) коэффициент λ не зависит от числа Рейнольдса, а определяется коэффициентом относительной шероховатости ε в соответствии с формулой Шифрисона

$$\lambda = 0{,}11\varepsilon^{0{,}25}. \qquad (7)$$

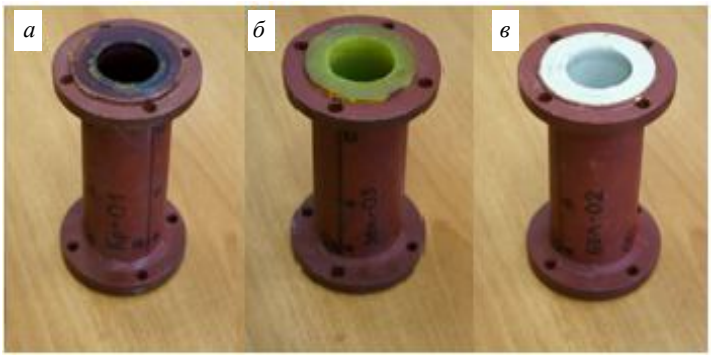


Рис.1. Общий вид опытных образцов труб с полиуретановым покрытием: *а* – твердость по Шору 83А; *б* – 85А; *в* – 90А



Рис.2. Общий вид измерительной установки
1 – профилометр; 2 – компьютер; 3 – ложемент; 4 – опытные образцы с полиуретановым покрытием; 5 – элемент стальной трубы (новая труба); 6 – элемент стальной трубы с приработанной шероховатостью (труба, бывшая в эксплуатации)

Физическая шероховатость внутренней поверхности трубопроводов. На кафедре горных транспортных машин Санкт-Петербургского горного университета были выполнены экспериментальные исследования шероховатости поверхностей трубопроводов, футерованных полиуретановым покрытием. Материал покрытия представлял собой полиуретан с твердостью поверхности по Шору 83А, 85А и 90А (ГОСТ 24621-91). Опытные образцы труб с покрытием показаны на рис.1.

Измерения шероховатости поверхности покрытий производились с помощью специального прибора SJ-210. Контактный профилометр (измеритель шероховатости) представляет собой индуктивный датчик (детектор в виде измерительного щупа) с алмазной иглой и опорой на измеряемую площадь [11]. Игла (щуп) движется перпендикулярно относительно проверяемой поверхности. Датчик генерирует импульсы, проходящие через электронный усилитель. Возникающие при этом механические колебания щупа преобразуются в цифровой сигнал. Обработка нескольких таких сигналов позволяет вычислить усредненное значение параметра – количественную характеристику неровности участка из расчета на определенную длину.

Для проведения измерений была собрана измерительная установка, общий вид которой показан на рис.2.

DOI: *10.18454/PMI.2017.3.330*

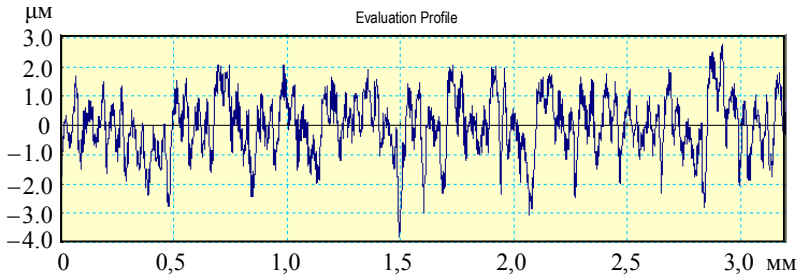
Пример отображения измерения № 1 приведен на рис.3. Измеренные и средние значения шероховатости опытных образцов труб с покрытием приведены в табл.1. Аналогичные измерения шероховатости были выполнены для элементов стенки стального трубопровода – нового и бывшего в эксплуатации (табл.2).

Для оценки характера и интенсивности изменения шероховатости опытных образцов труб с полиуретановым покрытием выполнены эксперименты по наработке шероховатости на лабораторном гидравлическом стенде. Подготовленная гидросмесь хвостов обогащения железной руды Качканарского ГОКа с концентрацией твердой фазы $c_р = 10$ % прокачивалась по кольцевому трубопроводу (рис.4), в линейной части которого были установлены последовательно три опытных образца труб с покрытием. Общее время наработки составило 484 ч.

Результаты экспериментов на опытном гидравлическом стенде приведены в табл.3. Из табл.3 видно, что шероховатость после наработки 484 ч на всех образцах опытных трубопроводов изменяется незначительно. Значения шероховатости находятся в интервале от 0,814 до 0,862 мкм. В результате обработки экспериментальных данных методами математической статистики была получена эмпирическая формула для расчета шероховатости в зависимости от времени работы трубопровода

$$R_a = 0{,}814 + 9{,}92 \cdot 10^{-5} T_{раб}, \quad (8)$$

где R_a – средняя шероховатость стенки трубы, мкм; $T_{раб}$ – время работы трубопровода, ч.



Work Name	Sample	Operator	Mitutoyo
Measuring Tool	SurfTest	Comment	Ver2.00

Standard	ISO 1997	N	4
Profile	R	Cut-Off	0.8mm
λs	2.5μm	Filter	GAUSS

Ra	0.799 μm	Rmr(c)2	2.609 %
Rq	1.007 μm	Rdc	0.581 μm
Rz	5.335 μm	Rt	6.557 μm
Rp	2.236 μm	Rz1max	5.868 μm
Rv	3.099 μm	Rk	2.536 μm
Rsk	-0.362	Rpk	0.771 μm
Rkμ	3.108	Rvk	1.249 μm
Rc	2.713 μm	Mr1	9.078 %
RSm	65.9 μm	Mr2	88.797 %
RDq	0.234	A1	3.50
Rmr	0.109 %	A2	7.00
Rmr(c)1	0.797 %		

Рис.3. Отображение результатов измерения шероховатости поверхности:
вверху – спектрограмма неровностей поверхности,
внизу – таблица значений параметров шероховатости

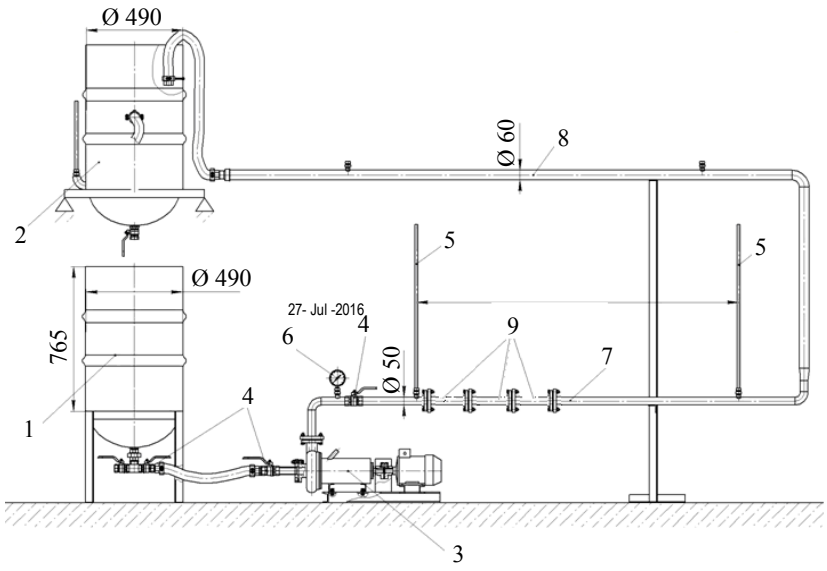


Рис.4. Схема экспериментального лабораторного стенда
1 – расходный бак 100 л; 2 – измерительный бак; 3 – насос ЦН30/18-У2 с асинхронным электродвигателем; 4 – шаровой кран; 5 – пьезометры; 6 – образцовый манометр; 7 – трубопровод с внутренним диаметром 50 мм; 8 – трубопровод с внутренним диаметром 60 мм; 9 – экспериментальные патрубки с внутренним полиуретановым покрытием

По уравнению (8) можно прогнозировать наработанную шероховатость во времени. Например, для времени $T_{раб}$ = 2000 ч (3 мес.) непрерывной работы системы гидротранспорта средняя шероховатость внутренней поверхности будет равна R_a = 1,012 мкм; для $T_{раб}$ = 2000 ч (5 мес.) R_a = 1,211 мкм; для $T_{раб}$ = 8000 ч (ориентировочно 1 год) R_a = 1,608 мкм.

Таблица 1

Результаты измерений шероховатости поверхности опытных образцов труб с полиуретановым покрытием

Точка замера	Образец красный, твердость 83А			Образец желтый, твердость 85А			Образец серый, твердость 90А		
	Линия I	Линия II	Линия III	Линия I	Линия II	Линия III	Линия I	Линия II	Линия III
A	1,343	0,379	0,54	1,266	0,642	0,564	0,780	0,798	0,636
B	0,73	0,996	0,696	1,389	1,248	0,877	0,799	0,730	0,726
C	0,893	0,57	0,457	0,876	1,039	1,135	0,91	0,554	0,412
R_a	0,988	0,648	0,564	1,177	0,976	0,859	0,830	0,694	0,591
$R_{a(\text{ср})} = \Delta$		**0,734**			**1,004**			**0,705**	

Таблица 2

Измеренные значения шероховатости внутренней поверхности стальных трубопроводов

Точка замера	Труба новая			Труба приработанная		
	Линия I	Линия II	Линия III	Линия I	Линия II	Линия III
A	2,749	2,809	2,821	5,147	4,199	3,883
B	4,742	4,883	4,913	4,2	3,964	4,088
C	4,903	4,358	4,306	4,618	5,199	5,199
R_a	4,131	4,016	4,306	4,618	4,454	4,39
$R_{a(\text{ср})} = \Delta$		**4,053**			**4,499**	

Таблица 3

Значения шероховатости приработанных образцов опытных труб

Опытный образец с твердостью по Шору	Средняя шероховатость ($R_a \cdot 10^3$) за время наработки, ч						
	0	4	28	52	148	242	484
83А	0,734	0,815	0,908	0,876	0,764	0,95	0,828
85А	1,004	1,031	0,975	1,063	0,782	0,788	0,822
90А	0,705	0,783	0,872	0,962	0,983	0,854	0,935
Среднее значение	**0,814**	**0,815**	**0,918**	**0,967**	**0,843**	**0,864**	**0,862**

Определение шероховатости, коэффициентов гидравлических сопротивлений и потерь напора. Принятая в гидравлике методика определения шероховатости Δ учитывает, что естественная (геометрическая $R_a = \Delta$) всегда неоднородна, выступы и впадины шероховатости имеют различные формы, расположение и размеры. Микрорельеф поверхности внутренних стенок труб зависит от многих факторов: материала, способа изготовления труб, физико-химических свойств перекачиваемой жидкости и срока эксплуатации.

Поскольку естественная шероховатость имеет многообразные нерегулярные формы (рис.5, *а*), установить каким-либо геометрическим способом осредненное значение высоты бугорков, определяющее влияние шероховатости на потерю напора, оказывается невозможным. Поэтому параметр шероховатости рассматривается как условная величина, определяемая по специальной шкале искусственной однородной шероховатости (рис.5, *б*).

Такая шкала построена с помощью калиброванных зерен песка, наклеиваемых на гладкую поверхность трубы. Набор таких труб при различном диаметре зерен Δ дает ряд значение относительной шероховатости Δ/*D*, в функции которой получены значения λ (формула И.Никурадзе) [4, 9, 10]

$$\lambda = \frac{1}{\left(2\lg\frac{\Delta}{D} + 1{,}14\right)^2}. \qquad (9)$$

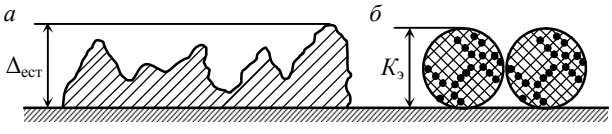


Рис.5. Естественная (*а*) и эквивалентная (*б*) шероховатости

С помощью специальной шкалы за абсолютную шероховатость принимается эквивалентная шероховатость, представляющую собой такой размер зерен песка искусственной шероховатости, который в квадратичной зоне равноценен по гидравлическому сопротивлению данной неоднородной поверхности.

DOI: 10.18454/PMI.2017.3.330

Результаты исследований [2] связи между коэффициентом эквивалентной и естественной шероховатости на 13 образцах труб из полиэтилена низкого и высокого давления диаметрами от 25 до 400 мм, а также результаты исследований, выполненные Г.А.Трухиным (два железобетонных коллектора диаметрами 1,6 и 1,94 м), ВНИИ ВОДГЕО (восемь водоводов из различных материалов диаметрами от 0,7 до 1,2 м), дали возможность установить математическую зависимость для определения этой связи:

$$K_э = 2\Delta^{1,33}. \quad (10)$$

Исходя из этих предпосылок, рассчитаем значение коэффициента эквивалентной шероховатости по формуле (10), задаваясь временем работы гидротранспортного трубопровода $T_{раб}$ = 1000 ч,

$$K_э = 2\cdot\left(0{,}814 + 9{,}92\cdot10^{-5}\cdot1000\right)^{1,33} = 1{,}772 \text{ мкм}.$$

Таким образом, ожидаемая величина эквивалентной шероховатости для трубопровода с покрытием внутренней поверхности трубы полиуретаном твердостью в диапазоне 83А – 95А после наработки трубопровода $T_{раб}$ = 1000 ч при перекачке гидросмеси хвостов обогащения Качканарского ГОКа с массовой концентрацией твердых около 10 %, будет равна $K_э$ = 1,772 мкм.

Принимаем полученное значение эквивалентной шероховатости для расчета коэффициента гидравлических сопротивлений λ и удельных потерь напора *I*. Определим коэффициент эквивалентной шероховатости для стального трубопровода, бывшего в эксплуатации. В соответствии с ГОСТ 8.586 1-2005 (ISO 5167-2003) эквивалентная шероховатость для стальных трубопроводов рассчитывается по формуле

$$K_э = \pi R_a. \quad (11)$$

Для расчета используем значение естественной шероховатости элемента гидротранспортного трубопровода $R_a = 4{,}49$ мкм (табл.2),

$$K_э = \pi\cdot4{,}49 = 14{,}1 \text{ мкм}.$$

Видно, что значения эквивалентной шероховатости для стального приработанного трубопровода значительно превышают значения для трубопровода с покрытием (практически в восемь раз). Соответственно, значительно будут различаться коэффициенты гидравлических сопротивлений и удельные потери напора.

Коэффициент гидравлических сопротивлений, являющийся функцией относительной шероховатости в квадратичной области трения (сопротивления), для трубопровода 1000 мм с внутренним полиуретановым покрытием в соответствии с формулой Шифрисона будет равен

$$\lambda_{фут} = 0{,}11\varepsilon^{0,25} = 0{,}11\left(\frac{K_э}{D}\right)^{0.25} = 0{,}11\left(\frac{1{,}772\cdot10^{-3}}{1000}\right)^{0.25} = 0{,}004.$$

Коэффициент гидравлических сопротивлений для стального приработанного трубопровода

$$\lambda_{ст} = 0{,}11\left(\frac{14{,}1\cdot10^{-3}}{1000}\right)^{0,25} = 0{,}007.$$

Удельные потери напора рассчитаем для условий Качканарского ГОКа с учетом новых значений коэффициентов гидравлических сопротивлений $\lambda_{фут}$ и $\lambda_{ст}$. Для потерь напора в трубопроводе, футерованным слоем полиуретана с прочностью по Шору от 83А до 90А,

$$I = I_в + \Delta I_в = \lambda_{фут}\frac{v^2}{2gD} + k_ρ\delta\sqrt[4]{j}\sqrt[3]{c_{об}^2};$$

$$I = 0{,}004\frac{4{,}8^2}{2\cdot9.81\cdot1{,}0} + 3{,}3\cdot0{,}056\cdot\sqrt[4]{0{,}2}\cdot\sqrt[3]{0{,}04^2} = 0{,}0155.$$

В стальном трубопроводе без покрытия

$$I = I_{в} + \Delta I_{в} = \lambda_{ст} \frac{v^2}{2gD} + \Delta I \ ;$$

$$I = 0{,}007 \frac{4{,}8^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 1{,}0} + 3.3 \cdot 0{,}056 \cdot \sqrt[4]{0{,}2} \cdot \sqrt[3]{0{,}04^2} = 0{,}0232 \ .$$

Результаты расчетов коэффициентов шероховатости, гидравлических сопротивлений и удельных потерь напора (трубопровод D = 1000 мм, время наработки $T_{раб}$ = 1000 ч) приведены в табл.4.

Таблица 4

Расчетные значения

Трубопровод	Параметры			
	Физическая шероховатость Δ, мкм	Эквивалентная шероховатость $K_э$, мкм	Коэффициент гидравлических сопротивлений λ	Удельные потери напора I, м вод. ст/м
Полиуретановое покрытие	0,913	1,772	0,004	0,0155
Стальной	4,49	14,1	0,007	0,0232

Заключение

1. Установленные значения шероховатости поверхности полиуретановых покрытий, значения коэффициентов относительной шероховатости и расчетные значения удельных потерь напора подтверждают эффективность использования трубопроводов с полиуретановым покрытием внутренней поверхности в системах гидротранспорта хвостовых пульп.

2. Твердость поверхности полиуретановых покрытий по Шору в диапазоне значений от 83 А до 90 А (экспериментальные покрытия) не оказывает практического влияния на интенсивность изменения шероховатости поверхности покрытия.

3. Гидравлические сопротивления пульповодов при транспортировании хвостовой пульпы с массовой концентрацией твердой фазы $c_р$ = 10 % пропорциональны отношению эквивалентной шероховатости $K_э$ к диаметру трубопровода по формуле $\lambda = 0{,}11\left(\frac{K_э}{D}\right)^{0{,}25}$. Для рабочего диаметра трубопровода 1000 мм при работе в зоне квадратичного трения (развитый турбулентный режим потока гидросмеси) коэффициент гидравлических сопротивлений в среднем за 1000 ч непрерывной работы не превысит $\lambda_{ср} = 0{,}004$.

4. Расчетные значения удельных потерь напора в трубопроводе с полиуретановым покрытием при гидравлическом транспорте гидросмеси хвостов обогащения с массовой концентрацией твердой фазы $c_р$ = 10 % составляют $I_{см.фут}$ = 15,5 м вод. ст/км, что практически в 1,5 раза меньше, чем в стальном трубопроводе без покрытия ($I_{см.фут}$ = 23,2 м вод. ст/км).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров В.И.* Удельная энергоемкость гидравлического транспортирования продуктов переработки минерального сырья / В.И.Александров, С.Ю.Авксентьев, И.М.Горелкин // Обогащение руд. 2012. № 3. С. 39-42.

2. *Добромыслов А.Я.* Таблицы для гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов. М.: Изд-во ВНИИМП, 2004. 209 с.

3. *Alexandrov V.I.* The rheological properties of high concentration slurry at pipeline transportation on example of copper-nickel ore tailings / V.I.Alexandrov, M.A.Vasylieva // Reports of the XXIII Int. Sci. Symp. «Miner's week – 2015». 2015. P. 452-460.

4. An analysis of the hydraulic transport of solids in horizontal pipes / T.Yagi, T.Okude, S.Miyazaki, A.Koreishi // Report of the Port & Harbour Research Institute (Japan). 1972. Vol. 11. № 3.

5. *Darcy H.* Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. Paris: Malet-Bachelier, 1857.

6. *Heywood N.* Developments in slurry pipeline technologies / N.Heywood, J.Alderman // Chem. Eng. 2003. Vol. 4. P. 100-107.

DOI: *10.18454/PMI.2017.3.330*

7. *Heywood N.* Head loss reduction by gas injection for highly shear thinning suspensions in horizontal pipe flow / N.Heywood, J.Richardson // Proc. Hydrotransport 5. BHRA Fluid Engineering, 1978. P. 146-152.

8. *Kumar U.* Bi-modal slurry pressure drop characteristics at high concentration in straight horizontal pipes / U.Kumar, S.N.Singh, V.Seshadri // Engineering and Technical Research. 2015. Vol. 3. Is. 4. P. 394-397.

9. *Nikuradse J.* Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Rohren // Ing. Forschungsheft. 1932. № 356.

10. *Nikuradse J.* Stromungsgesetze in rauhen Rohren // Ing. Forschungsheft. 1933. № 361.

11. Portable Surface Roughness Tester SURFTEST SJ-210 Series. Mitutoyo America Corporation. URL: http://www. mitutoyo.com/Images/003/316/2140_SJ-210.

12. *Schmitt D.J.* Experimental investigation of surface roughness microstructures and their effects on pressure drop characteristics in rectangular minichannels: M. S. thesis. Rochester Institute of Technology, 2004.

***Авторы*: В.И.Александров**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *заведующий кафедрой*, *alexvict@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*), **С.А.Тимухин**, *д-р техн. наук*, *профессор*, *gmf.gm@m.ursmu.ru* (*Уральский государственный горный университет*, *Екатеринбург*, *Россия*), **П.Н.Махараткин,** *канд. техн. наук*, *доцент*, *pavelnik@spmi.ru* (*Санкт-Петербургский горный университет*, *Санкт-Петербург*, *Россия*).

Статья принята к публикации 2.02.2017.