УДК 622.3

А.Б.НЕЗАМЕТДИНОВ
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

ГИДРАВЛИЧЕКАЯ КРУПНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

В угольных частицах после дробления на различном оборудовании выделены формы игл, кубов, пластин, параллелепипедов и пирамид.

После анализа исследований для определения скорости стесненного падения различных по форме частиц в воде (гидравлической крупности) предложены зависимости, учитывающие плотность гетерогенной несущей фазы, эффективную вязкость воды, содержащей шлам угля в различном количестве, эквивалентный диаметр и кажущуюся плотность сухого угля при фактической зольности и средней общей влаге.

Having accounted coal particles after fragmentation on different equipment, particles in the form of needles, cubes, plates, blocks and pyramids were distinguished.

After the analysis of the research [2-10] to define the speed hindered falling of particles of different forms in water (hydraulic fineness) there have been proposed dependencies considering the density of the heterogeneous carrier phase, effective viscosity of water containing coal mud in different quantity, equivalent diameter for different forms of coal particles and the seeming density of dry coal at a specific ash content and average humidity.

После дробления угля его частицы принимают форму игл, кубов, пластин, параллелепипедов и пирамид [5]. Скорость относительного движения этих взвешенных в потоке частиц не сильно отличается от условий свободного падения в спокойной жидкости со скоростями: $V_0^{\text{èãë}}$, $V_0^{\text{êóá}}$, $V_0^{\text{ïë}}$, $V_0^{\text{ïàð}}$, $V_0^{\text{ïëð}}$, которые называют гидравлическими крупностями соответствующих частиц.

Исследованиям, направленным на изучение минеральных частиц различной формы, посвящены работы Риттингера, Стокса, Аллена, Ричардса, Монроэ, В.М.Маккавеева, М.А.Великанова, П.В.Лященко и др.

В их работах часто рассматриваются режимы транспортирования потоками текучего частиц шарообразной формы.

Минеральные частицы, подвергающиеся процессам обогащения и транспортирования, не имеют правильной шарообразной формы, поэтому зависимости предложенные, например, Стоксом для определения скорости их падения, можно применить в узком диапазоне числа Рейнольдса, к малому числу частиц гранулометрического состава водоугольной суспензии.

Для некоторых минералов П.В.Лященко выделил зерна неправильной формы: для касситерита продолговатые, угловатые, полукруглые, для магнетита угловатые, продольные, для золота пластинчатые, продолговатые, окатанные и предложил зависимости для определения гидравлической крупности, учитывающие форму зерна минерала,

$$V_0 = \frac{\mathrm{Re}\,\mu}{d_{\text{ý}}\rho_w}, \qquad (1)$$

где V_0 – конечная скорость падения зерна (гидравлическая крупность); Re – критерий Рейнольдса; $\mu = 0{,}01$ – динамический коэффициент вязкости воды; ρ_w – плотность воды; $d_э$ – эквивалентный диаметр зерна.

Эмпирические формулы для конечных скоростей падения минеральных зерен и пределы их применения приведены в табл.1.

В табл.1:

$$A = \sqrt{\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w}}\,;\; B = \frac{1}{\sqrt[7]{\upsilon}}\left(\frac{\rho - \rho_w}{\rho_w}\right)^{\frac{4}{7}} d_{\text{ý}}^{\frac{5}{7}}. \qquad (2)$$

где υ – кинематический коэффициент вязкости воды; ρ – плотность минерального зерна.

Таблица 1

Зависимость гидравлической крупности от формы зерен

Форма зерен	Пределы значения Re	
	От 2000 до 500	От 500 до 100
Пластинчатые	$V_0 = 22{,}7A$	$V_0 = 14{,}38B$
Продолговатые	$V_0 = 33{,}4A$	$V_0 = 21{,}21B$
Угловатые	$V_0 = 35{,}8A$	$V_0 = 23{,}96B$
Округлые	$V_0 = 42{,}2A$	$V_0 = 28{,}03B$

Движение минеральных частиц происходит в ограниченном пространстве, поэтому движение каждой из них резко нарушает влияние других одновременно движущихся частиц, вместе с тем сама среда (вода, флюид) испытывает динамическое действие каждой из частиц в отдельности и массы в целом. Это явление характеризуется условиями стесненного падения.

Значение коэффициента сопротивления свободного падения частицы ψ для одного и того же числа Рейнольдса будут весьма характерны для каждой формы зерна (табл.2).

Таблица 2

Зависимости между параметрами Re и ψ

Форма зерен	Пределы значения Re	
	От 2000 до 500	От 500 до 100
Пластинчатая	$\psi = 1$	$\psi = \frac{1{,}54\pi}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$
Продолговатая	$\psi = \frac{0{,}29\pi}{\sqrt[11]{\mathrm{Re}}}$	$\psi = \frac{0{,}78\pi}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$
Угловатая	$\psi = \frac{0{,}21\pi}{\sqrt[12]{\mathrm{Re}}}$	$\psi = \frac{0{,}63\pi}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$
Округленная	$\psi = \frac{1}{2\sqrt[14]{\mathrm{Re}}}$	$\psi = \frac{2}{3}\cdot\frac{1}{\sqrt[4]{\mathrm{Re}}}$

П.В.Лященко предлагает эмпирическую формулу [4] скорости стесненного падения частицы:

$$V_{\text{ñò}} = V_0\sqrt{\theta^{n_1}} = k_v V_0, \qquad (3)$$

где θ – степень разрыхленности взвеси; n_1 – показатель степени, который изменяется от 6 до 7,6; k_v – коэффициент снижения скорости.

Коэффициент разрыхления при полной сплоченности зерен

$$\theta_0 = \frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma}, \qquad (4)$$

где γ – удельный вес минерала; γ_1 – насыпной вес минерала.

Насыпной вес угля определяется объемным весом угольных частиц и степенью заполнения объема этими частицами [1].

$$\gamma_1 = \zeta W^{\text{o}}, \qquad (5)$$

где γ_1 – насыпной вес дробленого угля; ζ – степень заполнения (часть объема емкости, занятая угольными частицами); W^{o} – объемный вес угольных частиц.

Например, насыпной вес угольной смеси, загруженный в камеры коксовых печей, неодинаков и в среднем колеблется от 0,7 до 0,85 т/м^3.

Степень заполнения объема угольными частицами зависит от многих факторов: количества и состояния влаги в угле, его ситового состава, степени метаморфизма и окисления угля и т.п.

Исследование влияния влажности угля на величину его насыпного веса показало, что он имеет минимальное значение при содержании влаги 6-10 % [1]. Влажность угля, соответствующая минимальному насыпному весу, меняется в зависимости от ситового состава угля.

М.П.Лонская [3] подразделяет воду в антрацитах и каменных углях на две категории – связанную и свободную. Первая находится у поверхности твердой фазы под воздействием абсорбционных сил. Связанная вода обладает рядом свойств, отличных от свойств обыкновенной воды. Плотность связанной воды у антрацитов доходит до 3, а у испытанных образцов каменных углей составляет 1,48-2,25 г/см^3.

Эксперименты с различными углями показали, что наибольший насыпной вес получится при наличии приблизительно равных количеств зерен крупного, среднего и мелкого классов.

Большая или меньшая степень гидрофобности зависит прежде всего от химической природы углей. Гидрофобные свойства значительно слабее представлены в газовых

и длиннопламенных углях, с одной стороны, в антрацитах и тощих углях, с другой. Это можно оценить по эмпирической формуле, выражающей зависимость увеличения насыпного веса от его элементарного состава:

$$\Delta\gamma_1 = m\frac{H}{O} + \left(n - \frac{k}{O+N}\right)C, \qquad (6)$$

где $\Delta\gamma_1$ – увеличение насыпного веса угля, %; H, O, N, C – соответственно содержание в угле водорода, кислорода, азота и углерода, %; m, n, k – константы, $n = 0{,}07$, $m = 0{,}2$, $k = 9{,}0$.

Результаты расчетов по уравнению (6) показывают, что максимальное повышение насыпного веса соответствует выходу летучих на горючую массу от 22 до 24 %.

Изменение насыпного веса углей при окислении определяется изменением их удельного веса, ситового состава и плотности упаковки частиц. Первый из этих факторов приводит к увеличению насыпного веса, а последние – к уменьшению.

После 72 ч окисления сухого угля наблюдается увеличение насыпного веса угля на 8,5-10,6 %. После 10 сут. окисления содержание кислорода в угольной смеси увеличивается с 5,76 до 12,92 % (табл.3).

Таблица 3

Влияние времени окисления сухого угля на его химический состав

Проба	Химический элемент				
	N^r	S^r	C^r	H^r	O^r
До окисления	1,75	0,46	86,67	5,34	5,76
После 3 суток окисления	1,84	0,44	83,18	5,09	9,45
После 5 суток окисления	1,80	0,45	82,22	4,66	10,87
После 10 суток окисления	1,79	0,46	80,10	4,73	12,92

Плотность воды для транспортирования изменяется в зависимости от температуры, солевого состава и содержания в ней твердых частиц угля [6]. Плотность химически чистой воды при температуре от 273 до 373 К имеет значения от 999,9 до 958,4 кг/м^3. Вода, применяемая в качестве несущей среды при транспортировании и на углеобогатительных фабриках [6], всегда содержит некоторое количество солей.

Плотность воды в зависимости от содержания солей (на примере поваренной соли) изменяется следующим образом: при содержании соли 1; 15; 30; 45; 59; 75 г/л или 0,1; 1,5; 2,9; 4,3; 5,6; 7,0 % плотность 1000; 1010; 1020; 1030; 1040; 1050 кг/м^3.

Зависимость плотности воды, загрязненной шламом угля, от содержания твердого, показана в табл.4.

Жесткость воды – свойство, обусловленное присутствием в ней растворенных солей кальция $Ca(HCO_3)_2$ и магния $Mg(HCO_3)_2$. Зная массу ионов кальция Ca^{2+} и Mg^{2+} в 1 кг воды, определяют ее жесткость по формуле

$$Æ = \frac{m_1 Ca^{2+}}{40{,}08} + \frac{m_2 Mg^{2+}}{24{,}32}, \qquad (7)$$

где m_1 и m_2 – масса ионов кальция и магния в 1 кг воды, мг/кг; 40,08 и 24,32 – молярная масса ионов кальция и магния, мг/ммоль.

Воду классифицируют по концентрации водородных ионов pH. Показатель pH менее 4,5 – вода очень кислая, 4,5-6 – слабокислая, 6-8 – почти нейтральная, 8-10 – слабощелочная, более 10 – сильнощелочная.

Таблица 4

Плотность воды, загрязненной шламом угля

Содержание твердой среды в воде, г/л	Плотность воды при плотности шлама, кг/м^3								
	1350	1400	1450	1500	1550	1600	2200	2300	2400
50	1012	1014	1016	1018	1019	1021	1042	1046	1050
100	1025	1029	1033	1036	1040	1044	1087	1094	1102
200	1049	1055	1063	1070	1077	1084	1168	1182	1196
300	1075	1086	1097	1108	1118	1129	1258	1279	1301
400	1100	1114	1128	1142	1156	1171	1342	1370	1398
500	1125	1143	1161	1179	1197	1214	1429	1465	1501
600	1150	1172	1194	1215	1237	1258	1516	1559	1602

Кроме того, вода загрязняется в результате выщелачивания из угля минеральных компонентов.

Минерализация воды $M_t^{\text{ã}}$ при контактах с окисленным и не окисленным углем, породой и пиритом характеризуется данными табл.5.

Таблица 5

Зависимость минерализации воды от времени контакта с водой

Наименование продукта	Время контакта с водой, ч	pH среды		Минерализация $M_t^{\text{ã}}$, мг/л
		В начале контакта	В конце контакта	
Уголь				
окисленный	6-12	3-6,2	7,0-7,2	222-899
не окисленный	1-60	–	–	504-540
Порода				
почвы	6-12	3-11	6,9-7,2	120-285
кровли	3-12	3-11	7,0-7,2	150-312
Пирит	3-12	3-11	6,5-7,1	865-2128

Кислая среда способствует растворению минеральных примесей.

О степени химического загрязнения воды судят по ее жесткости, концентрации водородных ионов pH и электропроводности. Электропроводность свежей технической и оборотной воды обогатительных фабрик колеблется в пределах от 405 до 5614 мкСм.

Вязкостные свойства воды, содержащей соли, загрязненной шламом угля, определяются эффективной вязкостью, которая в значительной степени зависит от крупности твердых частиц, содержащихся в воде (табл.6).

Таблица 6

Эффективная вязкость (10-3, Па·с) воды при различной крупности шлама

Содержание твердой среды в воде, г/л	Крупность твердых частиц, мм			
	Менее 1	Менее 0,25	Менее 0,075	Менее 0,045
0	1,140	1,140	1,140	1,140
100	1,208	1,204	1,208	1,211
200	1,275	1,280	1,308	1,295
300	1,321	1,339	1,428	1,429
400	1,434	1,458	1,607	1,613
500	1,614	1,720	1,955	2,114
600	1,704	2,477	2,955	3,396

Скорость осаждения частиц шлама в воде, содержащей 250 г/л твердого, по сравнению со скоростью осаждения шлама в чистой воде уменьшается в 3-3,5 раза при крупности осаждающихся частиц 125-50 мкм и в 4-10 раз при крупности частиц 50-12 мкм [7].

В работе [8] указан предел объемной концентрации, равный 2 %, выше которого начинается взаимодействие между частицами твердого в потоке.

В работе [9] утверждается, что при объемной концентрации твердых частиц более 5 % происходит стесненное осаждение частиц так, что конечная скорость не может рассчитываться по закону Стокса.

Ричардс исследовал падение неправильных минеральных зерен в воде и нашел, например, что зерна одинакового диаметра одного и того же вещества падают с разной скоростью, а относительная разность скоростей тем больше, чем меньше частицы и чем меньше их удельный вес (табл.7-9).

Таблица 7

Зависимость скорости падения зерен от их размеров

Минерал	Удельный вес, т/м^3	Размер зерен, мм	Скорость, мм/с	
			$V_{0\max}$	$V_{0\min}$
Антрацит	1,47	1,85	95,1	35,1
	1,47	0,5	41,4	10,5
	1,47	0,12	9,8	1,1

В работе [4] предлагается зависимость для определения скорости стесненного падения частиц в воде

$$V_{\tilde{n}\grave{o}} = V_0\sqrt{\theta^{n_1}}, \qquad (8)$$

где θ – степень разрыхленности взвеси.

Коэффициент сопротивления стесненного падения частицы [4] определяется по формуле

$$\psi_{\tilde{n}\grave{o}} = \frac{\psi}{\theta^6}, \qquad (9)$$

где ψ – коэффициент сопротивления свободного падения частицы.

Коэффициент разрыхления взвеси θ есть функция восходящей струи потока.

Таблица 8

Зависимость коэффициента сопротивления ψ от размера зерен *d*

Минерал	Размер зерен, мм	V_0, см/с	$V_{ст}$, см/с	θ	$V_{ñò}\frac{1}{\theta}$	$\psi_{ст}$
Уголь марки Г	0,59	16,95	3,62	0,63	0,214	$\psi_{ñò}=\frac{\psi}{\theta^6}$
	0,59	16,95	3,76	0,63	0,222	
	0,156	6,92	0,83	0,62	0,1195	$\psi_{ñò}=\frac{\psi}{\theta^{7,6}}$
	0,156	6,92	1,01	0,63	0,146	

Таблица 9

Зависимость ψ от Re для различных форм минеральных зерен

Форма зерен	ψ	Re	$\psi_{ст}$	ψ	Re	$\psi_{ст}$
Пластинчатые	2	40	$\frac{\psi}{\theta^6}$	1,0	450	$\frac{\psi}{\theta^{7,6}}$
Продолговатые	0,8	100		0,45	2000	
Угловатые	0,62	90		0,36	2000	
Округлые	0,5	90		0,28	3500	
Полукруглые	0,3	1600		0,28	3200	

Эмпирические формулы для конечных скоростей падения минеральных зерен, предложенные П.В.Лященко, для угольных пластин можно представить, если учесть [7-9]: для Re от 2000 до 500

$$V_0^{ïë} = \tilde{n}_1^{ï}\sqrt{\frac{\rho_{ó}-\rho_{íæ}}{\rho_{íæ}}};$$

для Re от 500 до 100

$$V_{oïë} = \tilde{n}_2^{ï}\frac{1}{\sqrt[7]{\mu_{íæ}}}\left(\frac{\rho_{ó}-\rho_{íæ}}{\rho_{íæ}}\right)^{\frac{4}{7}}\left(d_{ý}^{ïë}\right)^{\frac{5}{7}},$$

где $\rho_{ó}$ – кажущаяся плотность сухого угля при фактической зольности и средней общей влаге [2]; $\rho_{íæ}$ – плотность гетерогенной несущей фазы (плотность воды, загрязненной шламом угля) в зависимости от содержания твердой фазы в воде (см. табл.4); $d_{ý}^{ïë}$ – эквивалентный диаметр для твердых частиц угля в виде пластин стандартной фракции, мм; $c_1^{ï}$ и $\tilde{n}_2^{ï}$ – постоянные коэффициенты,

$$d_{ý}^{ïë} = \sqrt[3]{\frac{6àâñ}{\pi}},$$

а – толщина, *в* – длина, *с* – ширина пластины, мм.

Кинематический коэффициент вязкости несущей фазы

$$\upsilon_{íæ} = \frac{\mu_{ýâ}}{\rho_{íæ}},$$

где $\mu_{ýâ}$ – эффективная вязкость (см. табл.6) воды при различной крупности шлама в зависимости от содержания твердой фазы в воде, г/л;

Для зерен угля другой формы (параллелепипедов и кубов), учитывая их геометрическое строение, можно аналогично получить эквивалентные диаметры и конечные скорости падения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Агроскин А.А.* Физические свойства углей. М.: Гос. наун.-технич. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1961. С.308.

2. ГОСТ 2160-92 Топливо твердое минеральное, методы определения плотности. М.: Изд-во стандартов, 1992.

3. *Лонская М.П.* К вопросу распределения влаги в антрацитах и каменных углях // Химия твердых топлив. 1937. Т.VIII. Вып.7. С.604-611.

4. *Лященко П.В.* Гравитационные методы обогащения. М.: Недра, 1940.

5. *Незаметдинов А.Б.* Особенности подготовки угля перед гидротранспортированием на дальние расстояния / А.Б.Незаметдинов, В.Г.Ластов // Обогащение руд. 2001.№ 6. С.31-34.

6. *Самылин Н.А.* Водовоздушное хозяйство углеобогатительных фабрик / Н.А.Самылин, В.С.Буговецкий. М.: Недра, 1982. С.197.

7. Справочник по обогащению угля / И.С.Благов, А.М.Кошкина, Л.С.Зарубин и др. М.: Недра, 1984. С.614.

8. Steinour H. H., Ind. Eng. Chem., 36, 618, 840, 901, 1944.

9. *Caus B.H.* Proceedings of Symposim on Interaction between Fluids and Particles / B.H.Caus, R.P.Boardman // Inst. of Chem. Engrs, Lnd., 1962, p.17.