

# Методика расчета влаги осадка угольного шлама в фильтрующих центрифугах

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-00-00>



**КОЗЛОВ Вадим Анатольевич**

Канд. техн. наук, доцент,  
главный технолог  
«Коралина Инжиниринг»,  
105005, г. Москва, Россия,  
e-mail: vak@coralina.ru

Рассмотрена методика расчета остаточной влаги осадка из теории обезвоживания мелкого угля и угольного шлама в приложении к работе фильтрующих центрифуг. Вариант расчета остаточной влаги осадка предполагает учет капиллярного, маятникового и тонкопленочного водонасыщения, в результате чего можно оценить величину остаточной влаги осадка угольного шлама в зависимости от времени обезвоживания в фильтрующих центрифугах. **Ключевые слова:** обезвоживание угля, центробежная сила, капиллярная сила, маятниковое влагонасыщение, тонкопленочное влагонасыщение

Как уже отмечалось в предыдущей статье автора [1], полное влагонасыщение осадка можно рассматривать как сумму равновесного компонента  $S_\infty$  и переменного компонента  $S_T(t)$ :

$$S_{total} = S_\infty + S_T(t). \quad (1)$$

Переменный компонент уменьшается с течением времени воздействия центробежной силы. Время обезвоживания определяется временем нахождения осадка в корзине центрифуги.

В равновесном остаточном компоненте  $S_\infty$  можно выделить капиллярное влагонасыщение  $S_C$  в каналах между соприкасающимися стенками частиц осадка, влагонасыщение пор самих частиц  $S_p$  и маятниковое влагонасыщение  $S_Z$  в точках контакта частиц, связанные уравнением [2]:

$$S_\infty = S_C + (1 - S_C)(S_p + S_Z). \quad (2)$$

Переменный компонент составлен из тех же самых составляющих и дополнительно включает тонкопленочную остаточную жидкость, покрывающую поверхность частиц – влагонасыщение  $S_F$ . Этот компонент определяет длительность периода дренажа, особенно когда поверхность частицы имеет сложную форму (является негладкой):

$$S_T(t) = (1 - S_C)(1 - S_p - S_Z)S_F(t). \quad (3)$$

При достаточно большом времени дренажа тонкопленочное насыщение  $S_F$  можно вычислить по формуле:

$$S_F(t) = \frac{4/3}{t_d^n}, \quad (4)$$

где  $t_d$  – безразмерное время:

$$t_d = \frac{\rho G d_h^2 t}{\mu h}, \quad (5)$$

где:  $\rho$  – плотность жидкости;  $G$  – центробежное ускорение;  $h$  – толщина осадка;  $d_h$  – гидравлический радиус капилляра;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости;  $t$  – время обезвоживания.

Для частиц с гладкой поверхностью показатель для безразмерного времени  $n$  равен 0,5. Для частиц с шероховатой поверхностью или для тонких частиц, где сильные поверхностные силы удерживают влагу, дренирование которой занимает длительное время, показатель понижается до 0,15. Это подразумевает, что гладкие частицы могут достигнуть равновесной влажности осадка намного быстрее, чем частицы с шероховатой поверхностью.

Влагонасыщение  $S_p$  зависит от особенностей внутренней структуры угольной частицы и химического состава и не удаляется центробежной силой, развиваемой в промышленных центрифугах.

Выделяемое отдельно маятниковое влагонасыщение  $S_Z$  – это жидкость в точках контакта частицы с частицей, удерживаемая поверхностным натяжением. При анализе экспериментов по изучению движения воды в осадке получена корреляция маятникового насыщения со значением, так называемого капиллярного номера  $N_C$  [3]:

$$S_Z = 0,075 \text{ при } N_C \leq 5, \quad (6)$$

$$S_Z = \frac{5}{40 + 6N_C}, \text{ при } 5 \leq N_C \leq 10, \quad (7)$$

$$S_Z = \frac{0,5}{N_C} \text{ при } N_C \geq 10, \quad (8)$$

где капиллярный номер  $N_C = \frac{\rho G d_h^2}{\sigma \cos \theta}$ . (9)

Капиллярный номер  $N_C$  характеризует отношение центробежной силы, действующей на жидкость, к капиллярной силе. Когда центробежная сила превышает капиллярную силу, при условии  $N_C > 5$ , маятниковое насыщение определяется в соответствии с уравнениями (7) и (8).

Обозначим текущий уровень жидкости в осадке, измеряемый от стенки корзины до поверхности раздела воздух-жидкость, как « $y$ », и из баланса капиллярной силы  $\pi d_h \sigma \cos \theta$  и веса столбика жидкости в капилляре в центробежном поле  $\rho G \frac{\pi d_h^2 y}{4}$ , введя упрощение  $S_C = y/h$ , получаем [4]:

$$S_C = \frac{4}{B_0}, \quad (10)$$

где безразмерное число  $B_0$  определяется выражением:

$$B_0 = \frac{\rho G d_h h}{\sigma \cos \theta}, \quad (11)$$

где:  $\theta$  – краевой угол смачивания жидкостью твердого на разделе трех фаз;  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $d_h$  – гидравлический диаметр частицы;  $t$  – время обезвоживания.

Гидравлический диаметр канала капилляра  $d_h$  в осадке из частиц диаметром  $d$  может быть определен по формулам:  $d_h = 0,667\epsilon d / (1 - \epsilon)$  или  $d_h = 7,2(1 - \epsilon)K^{1/2} / \epsilon^{3/2}$ , где  $\epsilon$  – пористость осадка и  $K$  – водопроницаемость осадка.

На рис. 1 показаны характерные зависимости капиллярного влагонасыщения  $S_c$  осадка от безразмерного числа  $B_0$  и маятникового влагонасыщения  $S_z$  от капиллярного номера  $N_c$ .

Переменный компонент влагонасыщения  $S_T(t)$  зависит не только от величины центробежной силы  $G$ , толщины и структуры осадка, но также и от времени обезвоживания, которое определяет производительность центрифуги по твердому. Если производительность слишком большая или время обезвоживания слишком мало, остаточная влага осадка может быть неприемлемо высокой.

Максимальное значение маятникового влагонасыщения, согласно расчетам в теории фильтрации, составляет 7,5%, что является существенной величиной в общей структуре влаги осадка.

Следующие примеры показывают относительные значения влагонасыщения, рассчитанные по вышеприведенным формулам [5].

**Пример 1**

Дано:  $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\sigma \cos\theta = 0,068 \text{ Н/м}$ ;  $h = 2,54 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  (1 дюйм);  $d = 10^{-4} \text{ м}$  (100  $\mu$ );  $\epsilon = 0,4$ ;  $\frac{G}{g} = 1000$ ;  $S_p = 0,03$ , для двух случаев, когда  $n = 0,25$  (для частиц с шероховатой поверхностью) и  $n = 0,5$  (для частиц с гладкой поверхностью).

Вычисляем гидравлический диаметр капилляров:

$$d_h = 0,667 \left( \frac{0,4}{0,6} \right) \cdot 10^{-4} = 4,45 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Капиллярный номер:

$$N_c = \frac{(1000 \text{ кг/м}^3)(1000 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2)(4,45 \cdot 10^{-5} \text{ м})^2}{0,068 \text{ Н/м}} = 0,2854.$$

Так как  $N_c = 0,2854 < 5$ , принимаем согласно (6)  $S_z = 7,5\%$ .

Далее вычисляем:

$$B_0 = \frac{(1000 \text{ кг/м}^3)(1000 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2)(2,54 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2)(4,45 \cdot 10^{-5} \text{ м})}{0,068 \text{ Н/м}} = 163,$$

$$S_c = \frac{4}{B_0} = 0,0245,$$

$$S_p + S_z = 0,03 + 0,075 = 0,105,$$

$$S_\infty = S_c + (1 - S_c)(S_p + S_z) = 0,0245 + (1 - 0,0245)(0,105) = 0,1269,$$

$$S_T = (1 - S_c)(1 - \frac{S_p - S_z}{S_p + S_z}) S_F(t) = (1 - 0,0245)(1 - 0,105) S_F(t) = 0,8731 S_F(t).$$

Безразмерное время:

$$t_d = \frac{(1000 \text{ кг/м}^3)(1000 \cdot 9,8 \text{ м/с}^2)(4,45 \cdot 10^{-5} \text{ м})^2 \cdot t}{(4 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с})(2,54 \cdot 10^{-2} \text{ м})} = 191 \cdot t.$$

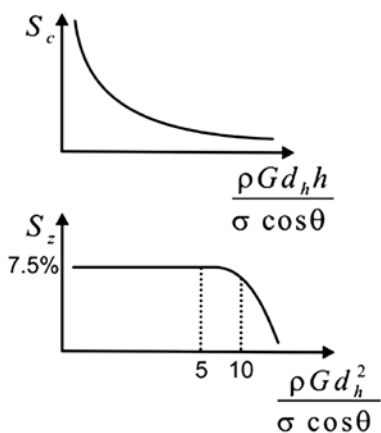


Рис. 1. Характер зависимостей влагонасыщений  $S_c(B_0)$  и  $S_z(N_c)$

Тонкопленочное влагонасыщение определяется выражением:

$$S_F(t) = \frac{133}{t_d^n}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1 и 2 для частиц с негладкой и гладкой поверхностями соответственно.

На рис. 2 сравниваются кривые общего влагонасыщения для частиц с негладкой и гладкой поверхностями.

Для осадка из частиц с гладкой поверхностью получаем за 60 с обезвоживания общую влагу 13,77%, тогда как для осадка, состоящего из частиц с шероховатой поверхностью, требуется 600 с, чтобы достигнуть общей влаги 19%.

**Пример 2**

Для сравнения выполним расчеты при тех же условиях, что и в примере 1, но увеличим  $G$  в два раза – до 2000g.

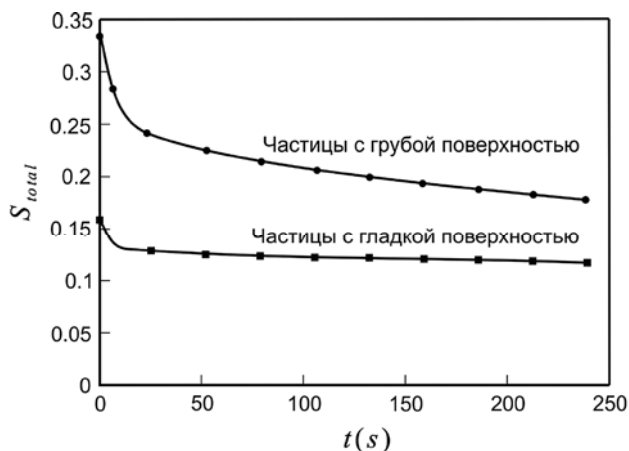


Рис. 2. Сравнения кривых осушения для частиц с шероховатой и гладкой поверхностями

Таблица 1

**Показатели для частиц с шероховатой поверхностью при G = 1000**

t, c	t_d	S_F	S_T	S_\infty	S_total
2	382	0,3008	0,2626	0,1269	0,3895
10	1910	0,2011	0,1756	0,1269	0,3025
20	3820	0,1692	0,1477	0,1269	0,2746
60	11460	0,1285	0,1122	0,1269	0,2391
120	22920	0,1081	0,0944	0,1269	0,2213
240	45840	0,0909	0,0794	0,1269	0,2063
600	114600	0,0723	0,0631	0,1269	0,19

Таблица 2

**Показатели для частиц с гладкой поверхностью при G = 1000**

t, c	t_d	S_F	S_T	S_\infty	S_total
2	382	0,0680	0,0594	0,1269	0,1863
10	1910	0,0304	0,0265	0,1269	0,1534
20	3820	0,0215	0,0188	0,1269	0,1457
60	11460	0,0124	0,0108	0,1269	0,1377
120	22920	0,0088	0,0077	0,1269	0,1346
240	45840	0,0062	0,0054	0,1269	0,1323
600	114600	0,0039	0,0034	0,1269	0,1303

Таблица 3

**Показатели для частиц с шероховатой поверхностью при  $G = 2000$**

$t, c$	$t_d$	$S_F$	$S_T$	$S_\infty$	$S_{total}$
2	764	0,253	0,2237	0,1159	0,3396
10	3820	0,1692	0,1496	0,1159	0,2655
20	7640	0,1423	0,1258	0,1159	0,2417
60	22920	0,1081	0,0956	0,1159	0,2115
120	45840	0,0909	0,0804	0,1159	0,1963
240	91680	0,0764	0,0675	0,1159	0,1834
600	229200	0,0608	0,0538	0,1159	0,1697

Таблица 4

**Показатели для частиц с гладкой поверхностью при  $G = 2000$**

$t, c$	$t_d$	$S_F$	$S_T$	$S_\infty$	$S_{total}$
2	764	0,0481	0,0425	0,1159	0,1584
10	3820	0,0215	0,019	0,1159	0,1349
20	7640	0,0152	0,0134	0,1159	0,1293
60	22920	0,0088	0,0078	0,1159	0,1237
120	45840	0,0062	0,0055	0,1159	0,1214
240	91680	0,0044	0,0039	0,1159	0,1198
300	114600	0,0039	0,0034	0,1159	0,1193

Таблица 5

**Показатели для частиц с шероховатой поверхностью при  $h = 2$  дюйма**

$t, c$	$t_d$	$S_F$	$S_T$	$S_\infty$	$S_{total}$
2	191	0,3578	0,3163	0,116	0,4323
10	955	0,2392	0,2115	0,116	0,3275
20	1910	0,2012	0,1779	0,116	0,2939
60	5730	0,1529	0,1351	0,116	0,2511
120	11460	0,1285	0,1136	0,116	0,2296
240	22920	0,1081	0,0956	0,116	0,2116
600	57300	0,086	0,076	0,116	0,192

Таблица 6

**Показатели для частиц с гладкой поверхностью при  $h = 2$  дюйма**

$t, c$	$t_d$	$S_F$	$S_T$	$S_\infty$	$S_{total}$
2	191	0,0962	0,085	0,116	0,201
10	955	0,043	0,038	0,116	0,154
20	1910	0,0304	0,0269	0,116	0,1429
60	5730	0,0176	0,0156	0,116	0,1316
120	11460	0,0124	0,011	0,116	0,127
240	22920	0,0088	0,0078	0,116	0,1238
600	57300	0,0056	0,005	0,116	0,121

Маятниковое влагонасыщение остается, как и прежде, на уровне  $S_z = 7,5\%$ . Тогда как капиллярное насыщение  $S_c$  уменьшается до 1,23% по сравнению со значением 2,45% для предыдущего примера. Это приводит к уменьшению значения постоянного члена влагонасыщения  $S_\infty$  до 11,59% по сравнению с предыдущим примером 12,69%. В табл. 3 и 4 приведены результаты расчетов для частиц с шероховатой и гладкой поверхностями.

Осадок с гладкой поверхностью частиц достигает за 60 с общей влаги 12,37% (в предыдущем примере было 13,77%), тогда как для осадка, состоящего из частиц с грубой поверхностью, требуется 600 с, чтобы достигнуть общей влаги 16,97% (в предыдущем примере было 19%).

**Пример 3**

Теперь в условиях примера 1 изменим только крупность частиц. Уменьшим их диаметр в два раза – до 50μ.

Маятниковое влагонасыщение остается также на уровне  $S_z = 7,5\%$ . Капиллярное насыщение  $S_c$  для более тонких частиц диаметром 50μ возрастает до 4,91% по сравнению со значением 2,45% для частиц диаметром 100μ. Это приводит к увеличению значения постоянного члена влагонасыщения  $S_\infty$  – до 14,89% по сравнению с примером 1, где  $S_\infty = 12,69\%$ .

**Пример 4**

В данном варианте в условиях примера 1 изменим толщину осадка – увеличим ее в два раза  $h = 5,08 \cdot 10^{-2}$  м (2 дюйма).

Маятниковое влагонасыщение остается на том же уровне:  $S_z = 7,5\%$ . Капиллярное насыщение  $S_c$  снижается до 1,23% по сравнению со значением 2,45% для осадка в 1 дюйм. Это приводит к уменьшению значения постоянного члена влагонасыщения  $S_\infty$  до 11,6% по сравнению с примером 1, где  $S_\infty = 12,69\%$ .

В табл. 5 и 6 приведены результаты расчетов для частиц с шероховатой и гладкой поверхностями при толщине осадка 2 дюйма.

Для осадка с частицами с гладкой поверхностью получаем за 60 с общую влагу 13,16% (в примере 1 было 13,77%). Для осадка, состоящего из частиц с шероховатой поверхностью, требуется 600 с, чтобы достигнуть общей влаги 19,2% (в примере 1 было 19%). Для частиц с негладкой поверхностью при времени обезвоживания 60 с общая остаточная влага  $S_{total}$  осадка толщиной 2 дюйма будет 25,11%, а в примере 1 для осадка толщиной 1 дюйм общая влага составила 23,91%.

Таким образом, при увеличении толщины осадка уменьшилась капиллярная составляющая влагонасыщения  $S_c$ , но увеличились значения тонкоплочной составляющей влагонасыщения  $S_F$ . Характер динамики снижения влаги осадка во времени для частиц с гладкой и шероховатой поверхностями разный. Общее остаточное влагонасыщение для частиц с шероховатой поверхностью в процессе обезвоживания толстого осадка всегда остается больше, чем для более тонкого осадка. Для частиц с гладкой поверхностью общее влагонасыщение для более толстого осадка снижается быстрее и уже через 10 с становится меньше по сравнению со значениями для тонкого осадка.

В данной статье рассмотрен один из вариантов расчета остаточной влаги осадка, который предполагает учет капиллярного, маятникового и тонкоплочного водонасыщения, по результату которого можно оценить величину остаточной влаги осадка угольного шлама в зависимости от времени обезвоживания в фильтрующих центрифугах.

**Список литературы**

1. Козлов В.А. Процесс обезвоживания мелкого угля и угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Уголь. 2016. № 5. С. 91-93. doi: 10.18796/0041-5790-2016-5-91-93.
2. Mayer G. & Stahl W. Model for Mechanical Separation of Liquid in a Field of Centrifugal Force. Aufbereitungs-Technik, 1988, no. 11.
3. Leung, Wallace Woon-Fong. Industrial centrifugation technology. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1998.

4. Stadager C. & Stahl W. "The Superposition of Centrifugal and Gas Pressure Forces for Cake Filtration" in Proc. Am. Filt. Sep. Soc. Ann. Conf. (Nashville, TN, Apr. 23-26, 1995), vol. 9, K.-J. Choi (ed.), pp. 551-559.

5. Козлов В.А. Процессы дезатурации при обезвоживании угольного шлама в фильтрующих центрифугах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 5. С. 129-137.

COAL PREPARATION

UDC 622.794.252 © V.A. Kozlov, 2016  
ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2016, № 6, pp. 00-00

**Title**  
**METHODOLOGY OF COAL SLURRY CAKE MOISTURE ACCOUNTING IN FILTRATION CENTRIFUGES**

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2016-6-00-00>

**Author**

Kozlov V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>"Coraline Engineering" LLC, Moscow, 105005, Russian Federation

**Author's Information**

**Kozlov V.A.**, PhD (Engineering), Assistant Professor, Chief Process Engineer, e-mail: vak@coralina.ru

**Abstract**

The methodology of filtration cake residual moisture estimation based on small size coal and coal slurry dewatering theory is reviewed in the context of filtration centrifuges operation. The option of the filtration cake residual moisture estimation assumes capillary, pendulum and thin-film water saturation accounting, enabling evaluation of the coal slurry cake residual moisture as a function of dewatering duration in the filtration centrifuges.

**Keywords**

Coal dewatering, Centrifugal force, Capillary force, Pendular water saturation, Thin-film water saturation.

**References**

1. Kozlov V.A. Protsess obezvozhivaniya melkogo uglya i ugol'nogo shlama v fil'truyushchih centrifugah [Small size coal and coal slurry dewatering in filtration centrifuges]. *Ugol' – Russian Coal Journal*, 2016, no. 5, pp. 91-93. doi: 10.18796/0041-5790-2016-5-91-93.
2. Mayer G. & Stahl W. Model for Mechanical Separation of Liquid in a Field of Centrifugal Force. *Aufbereitungs-Technik*, 1988, no. 11.
3. Leung, Wallace Woon-Fong. Industrial centrifugation technology. McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1998.
4. Stadager C. & Stahl W. "The Superposition of Centrifugal and Gas Pressure Forces for Cake Filtration" in Proc. Am. Filt. Sep. Soc. Ann. Conf. (Nashville, TN, Apr. 23-26, 1995), vol. 9, K.-J. Choi (ed.), pp. 551-559.
5. Kozlov V.A. Protsessy dezaturatsii pri obezvozhivanii ugol'nogo shlama v fil'truyushchih tsentrifugah [Desaturation processes during coal slurry dewatering in filtration centrifuges]. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten – Mining Information-Analytical Bulletin*, 2013, no. 5, pp. 129-137.

## СУЭК поддержала проведение инженерного чемпионата «CASE-IN» в Забайкальском крае

Сибирская угольная энергетическая компания поддержала проведение регионального этапа Международного инженерного чемпионата «CASE-IN» в Забайкальском крае. СУЭК стала партнером проекта в лигах по горному делу и геологоразведке.



Региональный этап чемпионата состоялся 12 апреля 2016 г. в Забайкальском государственном университете. Участие в нем приняли пять команд. Студентам предлагали решить два кейса на выбор: разработать концепцию развития Быстринского ГОКа и проанализировать методику работ на рудопроявлении «Благоденское». Лучше всего с поставленными задачами справились команды «Забой» (Артём Зозуля, Егор Кислицин, Роман Левакшин, Иван Чугуевский) и «Тюбики» (Кристина Колесникова, Мария Пикатова, Алексей Сибатулин), которые представят Забайкальский край на всероссийском этапе уже в конце мая.

«CASE-IN» – масштабный практикоориентированный проект среди учащихся по специальностям топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплексов. Подобные интеллектуальные соревнования проводятся четвертый год. Забайкальский край стал их участником сразу же, в 2013 г. Сегодня к чемпионату присоединились уже 28 регионов России. Его поддерживают более

20 крупных отраслевых компаний. Среди стратегических партнеров на протяжении всего времени существования проекта – Сибирская угольная энергетическая компания.

«Данное мероприятие помогает нам, как ведущей компании в области угледобычи, сформировать своеобразный кадровый резерв, отобрать лучших студентов, способных уже сейчас стратегически мыслить и решать производственные задачи. Смена поколений необходима, нужен приток новых сил, идей для развития промышленности», – отметил заместитель генерального директора АО «Разрез Харанорский» **Петр Габидулин**, вошедший в этом году в экспертную комиссию регионального этапа чемпионата.

Вопросы подготовки специалистов в Забайкальском крае всегда находятся в центре внимания СУЭК. Предприятия принимают студентов на практику, обеспечивают полигоны учебных заведений оборудованием, отработавшим свой ресурс на производстве, но необходимым при обучении. В ближайшее время горняков в Забайкалье компания начнет растить со школьной скамьи: в поселке Шерловая Гора с нового учебного года планируется набор в «горный» класс. Проект будет реализован тремя сторонами: местной школой № 40, Забайкальским государственным университетом и АО «Разрез Харанорский».