

УДК 532.64

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ**

**В. А. Архипов<sup>1,2</sup>, Д. Ю. Палеев<sup>3</sup>, Ю. Ф. Патраков<sup>3</sup>, А. С. Усанина<sup>3,4</sup>**

<sup>1</sup>*НИИ ПММ Томского государственного университета,*

E-mail: leva@niipmm.tsu.ru,

*просп. Ленина, 36, корп. 10, 634050, г. Томск, Россия*

<sup>2</sup>*Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,*

E-mail: leva@niipmm.tsu.ru,

*ул. Социалистическая, 1, 659322, г. Бийск, Россия*

<sup>3</sup>*Институт угля СО РАН, E-mail: yupat@icc.kemsc.ru,*

*просп. Ленинградский, 10, 650065, г. Кемерово, Россия*

<sup>4</sup>*Томский государственный университет, E-mail: Usaninaanna@mail.ru,*

*просп. Ленина, 36, 634050, г. Томск, Россия*

Представлен новый способ определения смачиваемости мелкодисперсных угольных частиц при их осаждении на капли жидкости. Доля смоченных частиц рассчитывается по измеренным значениям спектральной оптической плотности пылевоздушной смеси. Предлагаемый способ обеспечивает проведение измерений непосредственно в пылевоздушной смеси без каких-либо механических воздействий на поверхность частиц угольной пыли, что способствует повышению точности определения характеристик смачиваемости.

*Уголь, угольная пыль, смачиваемость, пылевоздушная взвесь, спектральный коэффициент пропускания, коэффициент захвата*

Исследованию смачиваемости углей посвящено большое количество работ [1–6]. Это объясняется сложностью физико-химических процессов на границе раздела жидкой и твердой фаз, а также широким использованием технологий, для которых смачиваемость частиц дисперсной фазы определяет эффективность процессов. В качестве примера можно привести нейтрализацию угольной пыли в шахтах путем орошения жидкостью [7]. На свойствах смачиваемости угольной поверхности и минеральных примесей основан флотационный метод для обогащения многих полезных ископаемых, в том числе и угля [8].

Исследования смачиваемости мелкодисперсных частиц, в частности угольной взвеси, проводятся с использованием различных лабораторных методов. Существующие методы определения смачиваемости мелкодисперсных частиц можно разделить на две группы: относитель-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания № 2014/223 (код проекта 1567), Российского фонда фундаментальных исследований (№ 12-08-00313а) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (№ МК-1259.2013.1).

ные и непосредственного определения краевого угла смачивания [9]. Относительные методы фиксируют только косвенные величины, характеризующие процесс смачивания. К ним относится метод пленочной флотации [10], основанный на определении массы затонувших за определенное время частиц порошка, насыпанного тонким слоем на поверхность воды. Дополнительной характеристикой смачиваемости пыли водой служит кинетика смачивания. Этот показатель находится методом капиллярного впитывания [11] посредством измерения скорости впитывания влаги пылевым слоем при контакте его с влажной поверхностью. По результатам измерений строят кривые кинетики смачивания слоя пыли. Смачиваемость пыли увеличивается по мере возрастания объема поглощенной влаги. Пыль можно считать практически полностью смоченной в том случае, когда объем поглощенной влаги составляет примерно 92 % максимального объема смачивания.

Количественную оценку смачиваемости мелкодисперсных частиц позволяют получить такие методы определения краевого угла, как метод просачивания жидкости [3], гравиметрический [3], “метод центрифугирования” [12], метод капли на слое мелкодисперсных частиц [13],  $(h_d - \varepsilon)$ -метод [14], брикетирование частиц с последующим расчетом краевого угла капли [14], прессование частиц по специальной технологии с непосредственным измерением краевого угла капли [15].

Несмотря на большое количество методов исследования смачиваемости мелкодисперсных частиц, задача разработки адекватного метода определения смачиваемости угольной поверхности до сих пор остается актуальной. Поскольку уголь представляет собой органическую осадочную горную породу со сложной структурой, то вопрос определения его смачиваемости является достаточно сложным и неоднозначным. В работах [16, 17] показано, что краевой угол смачивания для одного типа угля зависит от технологии приготовления поверхности и способа исследования. В связи с этим для повышения точности определения смачиваемости частиц угольной пыли предложено проводить измерения с учетом условий применения материала в конкретных процессах и технологиях.

В настоящей работе предложен новый способ определения смачиваемости мелкодисперсных угольных частиц, соответствующий условиям процесса гидроподавления пыли в шахтах путем распыления жидкости над взвешенными частицами угольной пыли в воздухе. Цель работы — разработка более точного способа определения характеристик смачиваемости мелкодисперсных частиц, позволяющего проводить измерения непосредственно в пылевоздушной смеси.

Суть предлагаемого способа заключается в том, что в кювете с прозрачными плоскопараллельными стенками создается равномерная взвесь частиц порошка (рис. 1). С помощью лазера и приемника излучения измеряется спектральный коэффициент пропускания взвеси частиц. Затем из системы подачи капель в кювету поступает поток монодисперсных капель в течение некоторого промежутка времени. Далее повторно измеряется спектральный коэффициент пропускания.

В качестве характеристики смачиваемости принята массовая доля осевших на одиночной капле частиц пыли (смоченных частиц):

$$\beta = m_c / m, \quad (1)$$

где  $m_c$  — масса смоченных частиц пыли (осевших на каплю);  $m$  — масса частиц пыли, столкнувшихся с каплей в процессе ее гравитационного осаждения в кювете.

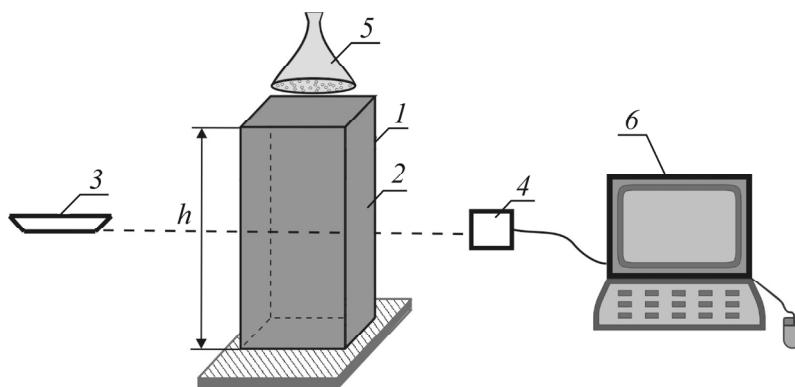


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения смачиваемости мелкодисперсных частиц: 1 — кювета; 2 — взвесь частиц; 3 — лазер; 4 — приемник излучения; 5 — система подачи капель; 6 — компьютер

При осаждении капли жидкости диаметром  $D$  в кювете высотой  $h$  величина  $m$  рассчитывается по формуле (рис. 2)

$$m = \frac{\pi D^2}{4} hc\eta,$$

где  $c$  — массовая концентрация частиц пыли в кювете;  $\eta \leq 1$  — коэффициент захвата.

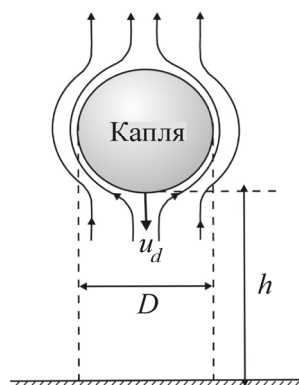


Рис. 2. Схема осаждения капли

Масса смоченных частиц пыли с учетом (1) равна

$$m_c = \beta m = \beta \frac{\pi D^2}{4} hc\eta. \quad (2)$$

При анализе осаждения частиц пыли на движущуюся каплю необходимо учитывать искривление линий тока запыленного потока пылевоздушной среды (см. рис. 2). Коэффициент захвата  $\eta$  — это отношение числа частиц, соударяющихся с препятствием (каплей), к числу частиц, которые соударились бы, если бы линии тока не отклонились от препятствия. В результате этого эффекта не все частицы, расположенные в сечении  $S = \pi D^2 / 4$  (миделевом сечении капли), столкнутся с ней. Доля столкнувшихся частиц определяется (для потенциального обтекания) формулой Ленгмюра – Блоджетт [18]:

$$\eta = \left( \frac{Stk}{Stk + 0.125} \right)^2, \quad (3)$$

где  $Stk$  — число Стокса.

Для расчета коэффициента захвата необходимо знать число Стокса, входящее в формулу (3). Для монодисперсных частиц пыли диаметром  $D_p$  число Стокса находится выражением

$$\text{Stk} = \frac{\rho_p D_p^2 u}{18\mu D},$$

где  $\rho_p$  — плотность части пыли;  $D_p$  — диаметр частиц пыли;  $u$  — скорость осаждения капли жидкости;  $\mu$  — коэффициент динамической вязкости воздуха;  $D$  — диаметр капли.

Поскольку взвесь пыли представляет собой совокупность полидисперсных частиц, необходимо использовать осредненное число Стокса [19]:

$$\text{Stk} = \int_0^{\infty} \frac{\rho_p D_p^2 \varphi(D_p) u}{18\mu D} dD_p = \frac{\rho_p u}{18\mu D} \int_0^{\infty} D_p^2 \varphi(D_p) dD_p = \frac{\rho_p u}{18\mu D} D_{20},$$

где  $\varphi(D_p)$  — дифференциальная функция счетного распределения частиц пыли по размерам;

$D_{20} = \int_0^{\infty} D_p^2 \varphi(D_p) dD_p$  — среднеквадратичный диаметр частиц пыли.

Для подачи потока монодисперсных капель в верхней части кюветы (см. рис. 1) установлены  $n$  капельниц, расположенных равномерно в поперечном сечении кюветы. Все капельницы образуют капли одинакового диаметра  $D$  с частотой подачи  $f$  (количество образующихся капель в секунду). Таким образом, за промежуток времени  $t$  через кювету пройдет  $N$  капель:  $N = nft$ .

Поскольку масса частиц пыли, осевших на одной капле, может быть рассчитана по формуле (2), то для  $N$  капель суммарная масса смоченных частиц составит

$$M_c = \beta \frac{\pi D^2}{4} hcN\eta = \beta \frac{\pi D^2}{4} hcnft\eta. \quad (4)$$

Для определения параметра смачиваемости  $\beta$  необходимо учесть изменение во времени массовой концентрации частиц пыли в кювете, так как некоторая доля частиц осаждаются на каплях. Для этого запишем уравнение (4) в виде

$$dM_c(t) = \beta \frac{\pi D^2}{4} hc(t)nf\eta dt, \quad (5)$$

где  $dM_c(t)$  — масса смоченных частиц за время  $dt$ .

Смоченные частицы вместе с каплями осаждаются на дно кюветы, поэтому уменьшение суммарной массы частиц  $M(t)$ , взвешенных в кювете, равно

$$dM(t) = -dM_c(t). \quad (6)$$

С учетом (6) уравнение (5) примет вид

$$dM(t) = -\beta \frac{\pi D^2}{4} hc(t)nf\eta dt.$$

Разделив это уравнение почленно на объем кюветы  $V$ , получим

$$dc(t) = -\beta Bc(t)dt, \quad (7)$$

где

$$B = \frac{\pi D^2}{4V} hnf\eta = \text{const}. \quad (8)$$

Интегрируя (7) в пределах от  $t = 0$  до  $t$ , находим

$$c(t) = c_0 \exp(-\beta Bt), \quad (9)$$

где  $c(t)$  — массовая концентрация частиц пыли в произвольный момент времени  $t > 0$ ;  $c_0$  — начальная массовая концентрация частиц пыли.

Из уравнений (8) и (9) можно вычислить параметр смачиваемости  $\beta$ :

$$\beta = \frac{4V \ln[c_0 / c_k]}{\pi D^2 h n f t_k \eta}, \quad (10)$$

где  $c_k$  — концентрация в момент времени  $t_k$ , соответствующий прекращению подачи капель.

Для определения параметра смачиваемости  $\beta$  по формуле (10) необходимо найти массовую концентрацию частиц пыли в кювете в начальный момент времени  $c_0$  (начало подачи капель) и после осаждения капель  $c_k$ . Для этого равномерно распределенную в воздухе взвесь частиц пыли создают в кювете с плоскопараллельными стенками из прозрачного материала, например оптического стекла (см. рис. 1). С помощью источника зондирующего излучения (лазера) и приемника излучения измеряется спектральный коэффициент пропускания в кювете

$$T = I / I_0,$$

где  $I$  — интенсивность прошедшего через взвесь частиц излучения;  $I_0$  — интенсивность излучения входящего пучка.

В соответствии с законом Бугера [19]

$$T = \exp(-\tau),$$

где  $\tau = Kcl$  — спектральная оптическая плотность слоя частиц пыли,  $K$  — спектральный показатель ослабления, который характеризует ослабление света единичным объемом среды, содержащим независимо рассеивающие частицы,  $l$  — ширина кюветы (толщина слоя частиц пыли).

Для слоя полидисперсных частиц с функцией распределения  $\varphi(D_p)$  показатель ослабления равен [19]

$$K = \frac{3c}{2\rho_p} \frac{\int_0^{\infty} Q(\alpha, \bar{m}) D_p^2 \varphi(D_p) dD_p}{\int_0^{\infty} D_p^3 \varphi(D_p) dD_p},$$

где  $Q(\alpha, \bar{m})$  — фактор эффективности ослабления,  $\alpha = \pi D_p / \lambda$  — безразмерный параметр дифракции (параметр Ми),  $\lambda$  — длина волны зондирующего излучения,  $\bar{m}$  — комплексный показатель преломления материала частиц.

В предположении, что в процессе осаждения частиц пыли на каплю функция распределения  $\varphi(D_p)$  не изменяется, можно записать

$$\frac{c_0}{c_k} = \frac{\tau_0}{\tau_k} = \frac{\ln(1/T_0)}{\ln(1/T_k)}, \quad (11)$$

где  $\tau_0$ ,  $\tau_k$  — спектральная оптическая плотность слоя частиц пыли до и после осаждения капель соответственно.

Подставляя (11) в (10), получим формулу для расчета  $\beta$  :

$$\beta = \frac{4V \ln \left[ \left( \ln \frac{1}{T_0} \right) \left( \ln \frac{1}{T_k} \right)^{-1} \right]}{\pi D^2 h n f t_k \eta} . \quad (12)$$

Предлагаемый способ определения смачиваемости угольной пыли требует выполнения следующих условий:

1. Диаметр капли  $D$  должен варьировать в диапазоне 0.8–2.5 мм. Это связано с тем, что при осаждении в кювете капля должна сохранять сферическую форму.

Согласно экспериментальным данным [20, 21], капля не деформируется и сохраняет сферическую форму при значениях числа Вебера  $We < 0.15$ . В работе [21] экспериментальные данные по деформации капли аппроксимированы выражением

$$\psi = \sqrt{\exp(0.03 We^{1.5})} \cdot 100\% , \quad (13)$$

где  $\psi = D_m / D$  — мера деформации,  $D_m$  — диаметр миделева сечения деформированной капли.

Диапазон для  $D$  определялся путем проведения расчетов числа Вебера для капли воды, осаждающейся в воздухе. Скорость стационарного осаждения капель воды находится решением уравнения гравитационного осаждения сферической частицы. Зависимость для коэффициента сопротивления рассчитывалась по формуле Клячко [18]:

$$C_D = 24 / Re + 4 / \sqrt[3]{Re} ,$$

где  $Re = \rho u D / \mu$  — число Рейнольдса,  $\rho$  — плотность воздуха.

Число Вебера вычислялось по формуле  $We = \rho u^2 D / \sigma$ , где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения жидкости. Расчеты проводились для следующих значений параметров:  $\mu = 1.808 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с),  $\rho = 1.205$  кг/м<sup>3</sup>.

Результаты расчетов (табл. 1) показали, что для капель воды диаметром 0.8 и 2.5 мм при осаждении в воздухе значения числа Вебера составляют 0.13 и 2.5 соответственно. Согласно (13), при данных значениях числа Вебера мера деформации формы капли не превышает  $\psi \approx 0.1-5$  %. Использование капель меньшего диаметра связано с технической проблемой получения мелкодисперсных капель. В табл. 1 приведены также экспериментально определенные значения скорости осаждения капель воды в воздухе при давлении  $p = 100$  кПа и температуре  $T = 20$  °С [22], которые хорошо согласуются с расчетными данными.

ТАБЛИЦА 1. Параметры осаждения капли воды в воздухе

$D$ , мм	0.1	0.5	0.8	1	1.5	2	2.5	3
$u$ , м/с	0.25	2.01	3.15	3.9	5.5	7	7.8	8.6
$u_{\text{эксп}}$ , м/с	0.27	—	—	4.03	—	6.49	—	8.06
We	$10^{-4}$	0.03	0.13	0.25	0.75	1.6	2.5	3.7

2. Диаметр частиц порошка  $D_p$  должен быть не более 5 мкм. При  $D_p > 5$  мкм время осаждения частиц мало и частицы быстро осаждаются на дно кюветы. Результаты проведенных расчетов для скорости и времени осаждения частиц угольной пыли приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2. Параметры осаждения частиц угольной пыли в воздухе

$D_p = 20$ мкм					
Stk	5.8	5.7	5.4	5.2	4.6
$\eta$	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95
$t_p, c$	14	14	14	14	14
$D_p = 10$ мкм					
Stk	1.5	1.4	1.4	1.3	1.2
$\eta$	0.85	0.85	0.84	0.83	0.81
$t_p, c$	55	55	55	55	55
$D_p = 5$ мкм					
Stk	0.36	0.36	0.34	0.32	0.29
$\eta$	0.55	0.55	0.53	0.52	0.49
$t_p, c$	221	221	221	221	221
$D_p = 4$ мкм					
Stk	0.23	0.23	0.22	0.21	0.18
$\eta$	0.42	0.42	0.40	0.39	0.35
$t_p, c$	346	346	346	346	346
$D_p = 3$ мкм					
Stk	0.13	0.13	0.12	0.12	0.10
$\eta$	0.26	0.26	0.24	0.23	0.21
$t_p, c$	615	615	615	615	615
$D_p = 2$ мкм					
Stk	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05
$\eta$	0.1	0.01	0.09	0.09	0.07
$t_p, \text{мин}$	23	23	23	23	23
$D_p = 1$ мкм					
Stk	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
$\eta$	0.01	0.01	0.009	0.008	0.007
$t_p, \text{мин}$	92	92	92	92	92

Скорость и время осаждения частиц угля рассчитывались по формулам для стоксовского режима [18]:

$$u_p = g \frac{\rho_p D_p^2}{18\mu}, \quad t_p = h/u_p,$$

где  $h = 0.2$  м — высота измерительного объема;  $\rho_p = 1200$  кг/м<sup>3</sup> — плотность угольных частиц.

При значении диаметра частиц  $D_p = 5$  мкм время их осаждения составляет более 2 мин. Этого времени достаточно для измерения коэффициента пропускания до и после подачи совокупности капель.

3. Значение начального коэффициента пропускания должно быть  $T_0 \leq 0.2$ . Это объясняется тем, что погрешность расчета оптической плотности  $\tau$  тем меньше, чем больше чувствительность  $\tau$  от коэффициента пропускания. На рис. 3 приведены зависимости  $\tau(T)$  и  $(d\tau/dT)(T)$ , из которых видно, что при  $T_0 \leq 0.2$  наблюдается большая чувствительность оптической плотности от коэффициента пропускания.

4. Промежуток времени подачи капель рассчитывается из условия  $T_k > 2T_0$ . Выбор  $T_k > 2T_0$  находится из условия максимальной точности измерения коэффициента пропускания.

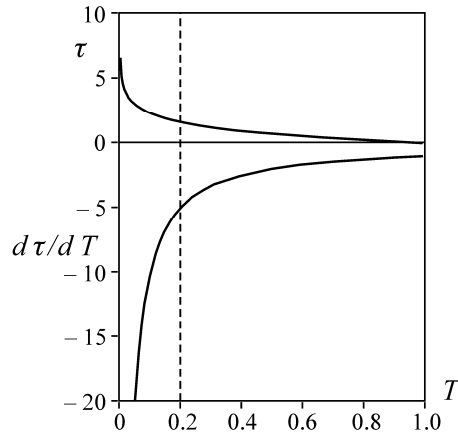


Рис. 3. Зависимость оптической плотности  $\tau$  и ее производной  $d\tau/dT$  от коэффициента пропускания

Эффективность предлагаемого способа определялась проведением прямых расчетов изменения концентрации и оптической плотности среды на примере частиц угольной пыли при их осаждении в воздухе при подаче капель воды для значений параметров, приведенных в табл. 3. Функция распределения угольных частиц, полученная с помощью установки Mastersizer 2000 (MALVERN, Великобритания), показана на рис. 4. Среднеквадратичный диаметр частиц равен  $D_{20} = 1.9$  мкм. Полученная функция аппроксимирована гамма-распределением

$$\varphi(D_p) = 15.9 D_p^{5.5} \exp(-3.6 D_p), \quad (14)$$

где  $[\varphi(D_p)] = \text{мкм}^{-1}$ ,  $[D_p] = \text{мкм}$ .

ТАБЛИЦА 3. Значения параметров для расчета  $\beta$

$\rho_p = 1200 \text{ кг/м}^3$	$\mu = 1.808 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}\cdot\text{с}$	$n = 50$	$f = 2 \text{ с}^{-1}$
$\rho = 1.205 \text{ кг/м}^3$	$h = 0.2 \text{ м}$	$V = 0.002 \text{ м}^3$	$\eta = 0.53$
$\rho_l = 1000 \text{ кг/м}^3$	$D = 1.5 \text{ мм}$	$c_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$	—

Результаты расчетов представлены на рис. 5. На рис. 5а приведена зависимость концентрации взвеси частиц угольной пыли от времени подачи капель при значении параметра смачиваемости  $\beta = 0.8$ , рассчитанная по формуле (9), на рис. 5б — зависимость отношения оптических плотностей  $\tau_0$  и  $\tau_k$  от времени подачи капель в кювету при значении  $\beta = 0.8$ , рассчитанная по формуле (11).

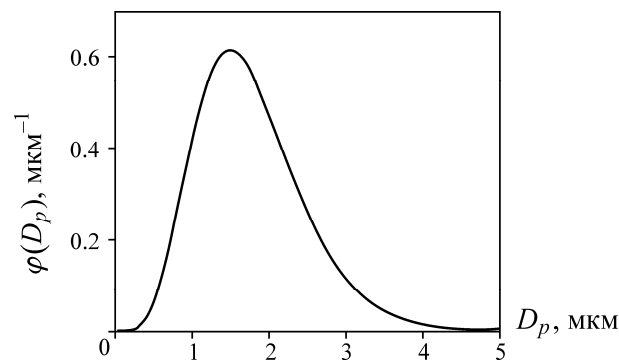


Рис. 4. Дифференциальная функция счетного распределения частиц угольной пыли по размерам



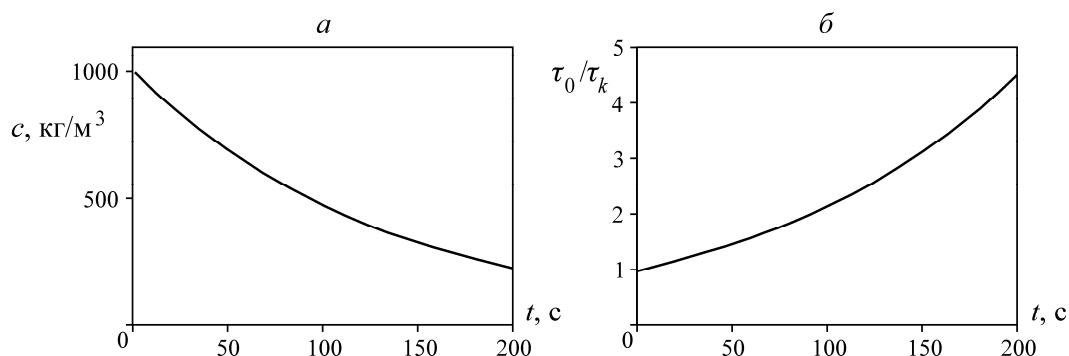


Рис. 5. Зависимость концентрации частиц угольной пыли (а) и отношения оптических плотностей частиц (б) с распределением (14) от времени подачи капель при значении  $\beta = 0.8$

Проверку адекватности способа можно провести, используя рис. 5. Для этого выбираем промежуток времени подачи капель  $t_k = 100$  с, при котором заметно изменение начальной концентрации взвеси и выполняется условие  $T_k > 2T_0$  для спектрального коэффициента пропускания. При значении времени  $t_k = 100$  с концентрация взвеси и отношение оптических плотностей равны  $c_k = 470$  кг/м<sup>3</sup>,  $\tau_0/\tau_k = 2.1$  соответственно. Подставляем найденные значения в конечную формулу (12) для расчета параметра смачиваемости и получаем значение параметра  $\beta$ , равное 0.8.

Как видно из приведенного примера, заданное и рассчитанное значения параметра смачиваемости совпадают ( $\beta = 0.8$ ). Аналогичные результаты получаются и для любого значения параметра смачиваемости в диапазоне  $0 < \beta < 1.0$ .

## ВЫВОДЫ

Предложен способ, позволяющий повысить точность определения характеристик смачиваемости частиц мелкодисперсной пыли и проводить измерение непосредственно в пылевоздушной смеси. Данный способ может найти применение для исследований широкого класса органических и неорганических мелкодисперсных частиц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Toshiaki Murata.** Wettability of coal estimated from the contact angle, *Fuel*, 1981, Vol. 60, No. 8.
2. **Fuerstenau D. W., Diao J.** Characterization of coal oxidation and coal wetting behavior by film flotation, *Coal Preparation*, 1992, Vol. 10.
3. **Chander S., Polat H., Mohal B.** Flotation and wettability of low-rank coal in the presence of surfactants, *Miner. Metall. Process*, 1994, Vol. 11, No. 1.
4. **Chander S., Hogg R., Fuerstenau D.W.** Characterization of the Wetting and Dewetting Behavior of Powders, *KONA*, 2007, No. 25.
5. **Li Man, Xu Hai-Hong, Shu Xin-qian.** Study on coal dust wettability measurement using cold briquetting technique, *Journal of coal science and engineering*, 2008, Vol. 14, No. 4.
6. **Gbasouzor Austin Ikechuks.** The effect of particle size on the wettability of akwuke coal using continuous flow technique, *Proceedings of the world congress on engineering and computer science*, 2011, Vol. 2, October 19–21, San-Francisco, USA.
7. **Пирумов А. И.** Обеспыливание воздуха. — М.: Стройиздат, 1981.

8. **Абрамов А.А.** Флотационные методы обогащения. — М.: Изд-во МГГУ, 2008.
9. **Де Жен П. Ж.** Смачивание: статика и динамика // *Успехи физ. наук.* — 1987. — Т. 151. — Вып. 4.
10. **Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И.** Справочник по пыле- и золоулавливанию. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
11. **Коузов П. А., Скрябина Л. Я.** Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. — Л.: Химия, 1983.
12. **Саранчук В. И., Журавлев В. П., Вейсенберг И. В.** Химические вещества для борьбы с пылью. — Киев: Наук. думка, 1987.
13. **Зимон А. Д.** Адгезия жидкости и смачивание. — М.: Химия, 1974.
14. **Kossen N. W., Heertjes P. M.** The determination of the contact angle for systems with powder, *Chemical Engineering Science*, 1965, Vol. 20, No. 6.
15. **Пат. № 2457464 РФ: МПК G 01 N 24/08.** Способ определения смачиваемости порошковых материалов / В. А. Архипов, Д. Ю. Палеев, В. Ф. Трофимов, А. С. Усанина; заявл. 28.02.2011; опубл. 27.07.2012. — Бюл. № 21.
16. **Немцев Е. А., Палеев Д. Ю., Усанина А. С.** Влияние способа приготовления образца на смачиваемость угольного порошка // XII Междунар. конф. молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”: тез. докл., 13–16 июня 2012 г. — Новосибирск, 2012.
17. **Архипов В. А., Палеев Д. Ю., Патраков Ю. Ф., Усанина А. С.** Определение характеристик смачиваемости порошковых материалов // *Изв. вузов. Физика.* — 2012. — Т. 55. — № 7/2.
18. **Шиляев М. И., Шиляев А. М.** Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. — Томск: Изд-во ТГАСУ, 2003.
19. **Архипов В. А., Бондарчук С. С.** Оптические методы диагностики гетерогенной плазмы продуктов сгорания: учеб. пособие. — Томск: Изд-во ТГУ, 2010.
20. **Гонор А. Л., Ривкин В. Я.** Динамика капли // *Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газа.* — М.: ВИНТИ, 1982. — Т. 17.
21. **Раушенбах Б. В., Белый С. А., Беспалов И. В., Бородачев В. Я., Волынский М. С., Прудников А. Г.** Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. — М.: Машиностроение, 1964.
22. **Матвеев Л. Т.** Физика атмосферы. — СПб.: Гидрометеоздат, 2000.

*Поступила в редакцию 6/II 2014*