



[1]

$$\Delta p = \Delta p_0 (1 + K\mu), \quad (1)$$

$\Delta p, \Delta p_0$  –

$\mu = G / G_0$  –

$G, G_0$  –

$K$  –

$K$

1

$K,$

$D, d$  –

$\dots, \dots$  –

$Re_D = \rho U D / \eta$      $Re_d = \rho |u| d / \eta$  –

$Re = \rho V d / \eta$  –

$\eta$  –

$U, V$  –

$\varepsilon = u / U$  –

$U$  –

$U, u = U - U$  –

$Fr = U^2 / (gD)$  –

$g$  –

$c_d$  –

$\lambda$  –

( ).

Таблица 1

Автор, год, источник	Формула определения гидравлического сопротивления	Диапазон изменения безразмерных параметров						Характеристика фаз
		$Re_D \cdot 10^{-4}$	$\mu$	$d/D \cdot 10^2$	$\rho_T/\rho$	$Fr$	$Re_v$	
Зеглер, 1954, [2]	$K = \frac{3D\rho c_d}{2d\rho_T \lambda} \frac{(1-\varepsilon)^3}{\varepsilon}$	5,7 – 88,6	0,1 – 10,5	0,7 – 6,5	1015	–	–	Воздух – пшеница, ячмень
Лобаев, 1959, [3]	$K = 1,25D \frac{\alpha}{1-\alpha}; \alpha = V_n/U$	2,3 – 88,6	0,1 – 29,5	0,7 – 6,5	1015	–	–	Воздух – пшеница
Дзядзио, Кеммер, 1967, [4]	$K = \begin{cases} 1,9 \cdot 10^{-2} Re_n^{0,32} Re_D^{-0,65} (D/d)^{-1,23}; \\ 4,6 \cdot 10^{-4} Re_n^{0,78} Re_D^{-0,32} (D/d)^{-1,37} \end{cases}$	–	1 – 6	0,83 – 20,0	1015	87 – 1670	700 – 6530	Воздух – просо, пшеница, соя
Горбис, 1970, [5]	$K = A'(d/D)^{0,1} Re_D^{0,65} Fr^{0,5} (\rho_T/\rho);$ $A' = A/0,3164 \quad A = (1,0 - 2,2) \cdot 10^{-6}$	11 – 320	1 – 15	0,9 – 8,7	573 – 1150	178 – 1300	–	Воздух – зола, шлак
Смолдырев, 1975, [6]	$K = c_0 a g D / U^2; a \approx \rho_T / \rho;$ $c_0 = 0,075 - 0,1; U < 1,5 U_{кр}$	0,13 – 0,9	5 – 100	$1,7 \cdot 10^{-3} - 3,3$	1000 – 5000	50 – 5500	–	Воздух – уголь, руда
Михаелидис, 1988, [7]	$K = \psi_{экс} \frac{\sqrt{Dg}}{\lambda U}; \psi_{экс} = 0,076 - 0,194$	–	–	–	–	–	–	Воздух – уголь, стекло, полиэтилен, песок, семена рапса, пшеница и др.
Шишкин, 2015, [8]	$K = \frac{3D\rho c_d}{2d\rho_T \lambda} \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon}$	–	–	–	–	–	–	–

( , ), 20 ( 0,17 3,3).  
 [3] , [3]

[2] [8],  
 (  $c_d$   $\lambda$  )  
 $\varepsilon$  .

$\varepsilon \rightarrow 0$  , 100 % (  $\varepsilon = 0,5$  )  $\varepsilon$  500 % (  $\varepsilon = 0,8$  ).

$u = U(1 - \varepsilon)$  ,  $\varepsilon$   $c_d$  ,  
 [8] ,

( )

$$\Delta p \quad (1).$$

$$N = N_0 + N , \quad (2)$$

$N$  - , ;  $N_0$  -  
 ;  $N$  - ,

$$N = \Delta p S U, \quad (3)$$

$$N_0 = \Delta p_0 S (1 - \beta) U, \quad (4)$$

$$N = 0,5 c_d \rho (U - U_0)^2 S L n, \quad (5)$$

S - ;  $\Delta p$  - -

( ) ;  $\beta$  - -

;  $S = \pi d^2 / 4$  - ;  $L$  - -

;  $n$  - , -

(2), (3) - (5)

$$\Delta p S U = 0,5 c_d \rho (U - U_0)^2 S L n + \Delta p_0 S (1 - \beta) U. \quad (6)$$

$$\Delta p_0 = 0,5 \lambda \rho U^2 L / D. \quad (7)$$

(7), (6)  $(1 - \beta) \approx 1$

$$\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = 1 + \frac{c_d (1 - U_0 / U)^2 d^2 D n}{\lambda D^2 U}. \quad (8)$$

$$n = \frac{6G}{\pi d^3 \rho}.$$

$$G = S \rho U \beta = S \rho U (1 - \beta) \mu,$$

$$n = \mu \frac{6 S \rho U (1 - \beta)}{\pi d^3 \rho}. \quad (9)$$

(9) (8)  $\beta$  , -

$$K = \frac{3}{2\lambda} c_d \frac{D \rho}{d \rho} (1 - \varepsilon)^2. \quad (10)$$

(10)  $\varepsilon$  -

$c_d$  -

, -

( ) . -

$\varepsilon$  . -

$\vec{F}_g,$  $\vec{F}_a,$  $(\quad) \vec{F}_M$  $(\quad) \vec{F}_S,$  $\vec{M}_c.$ 

[9 – 12]:

$$\vec{F}_a = 0,125 c_d d^2 (\vec{U} - \vec{U}_p) |\vec{U} - \vec{U}_p|,$$

$$\vec{F}_M = k_M d^3 \bar{\omega} \times (\vec{U} - \vec{U}_p),$$

$$F_S = k_s (y/\delta)^{1/2} d^2 (U_x - U_{px}) (dU/dy)^{1/2}$$

 $\bar{\omega} -$ ;  $k_M = 6,05\pi \text{Re}_\omega^{-0,39}$  $\text{Re}_\omega > 40$ ;  $\text{Re}_\omega = \rho |\bar{\omega}| d^2 / \eta$ ,  $k_s = 6,46$ ;  $U_x, U_{px} -$  $x,$  $m_p$ 

[9]

$$\begin{cases} m_p \frac{d\vec{U}_p}{dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_a + \vec{F}_M + \vec{F}_S, \\ I_p \frac{d\bar{\omega}_p}{dt} = \vec{M}_c, \\ \frac{d\vec{r}_p}{dt} = \vec{U}_p, \end{cases} \quad (11)$$

 $I_p -$ ;  $\vec{U}_p -$ ;  $\vec{r}_p -$ ;  $\bar{\omega}_p -$ ;  $\vec{F}_g = m_p \vec{g} -$ ;  $\vec{g} -$ 

$$m_p = \pi \rho d^3 / 6, \quad I_p = \pi \rho d^5 / 60.$$

:  $\vec{x}_p^0, \vec{U}_p^0, \bar{\omega}_p^0.$ 

(11)

(11)



$$\begin{cases} u_p^* = \frac{5+2 \cdot k}{7} \cdot u_p \pm \frac{k-1}{7} \cdot d \cdot \rho; \\ v_p^* = -k_n \cdot v_p; \\ \omega_p^* = \frac{5 \cdot k + 2}{7} \omega_p \mp \frac{10 \cdot (1-k)}{7 \cdot d} \cdot u_p, \end{cases} \quad (13)$$

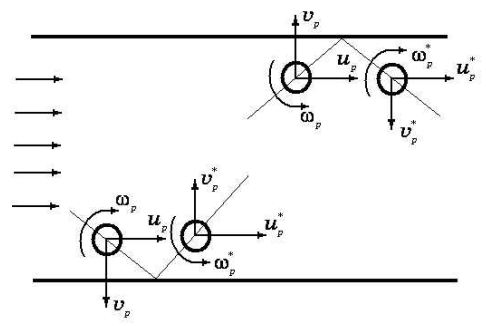
$u_p, v_p, \omega_p -$

$; u_p^*, v_p^*, \omega_p^* -$

$; k_n, k -$

(13)

$(k_n < 1 \quad k < 1)$





$\Delta t$

$\Delta y$

$\Delta t$

$\Delta y$

[11].

$\varepsilon$

$u$

$n$

$\Delta y$

(12)

$\Delta t = \Delta t / \varphi$

$\varphi > 1$

$x_p$

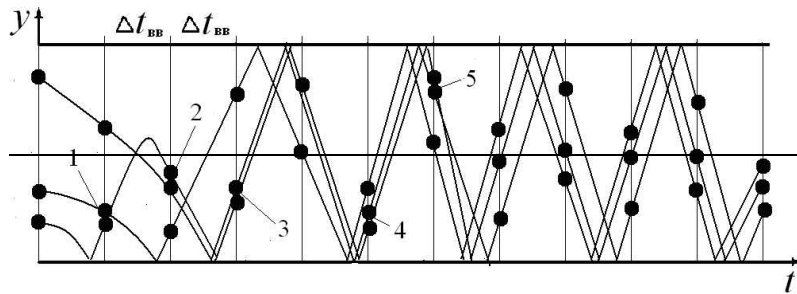
$y_p$

$\Delta t$

. 2.

1, 2,

3...



. 2

$$\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2} \leq d,$$

$x, y, x', y'$

( )

$$\Delta p = c_d \cdot \varepsilon \cdot \left( \dots \right) \quad (11)$$

$$(12) \quad \bar{x}_p = 0; \quad \bar{y}_p = \bar{y}_{pi}; \quad \bar{u}_p = \bar{v}_p = \bar{\omega}_p = 0.$$

$$\varepsilon, c_d, \lambda,$$

(10),

[1].

. 3

$$U = 27,3 / ( \dots 3, \dots ) \quad U = 12,8 / ( \dots 3, \dots )$$

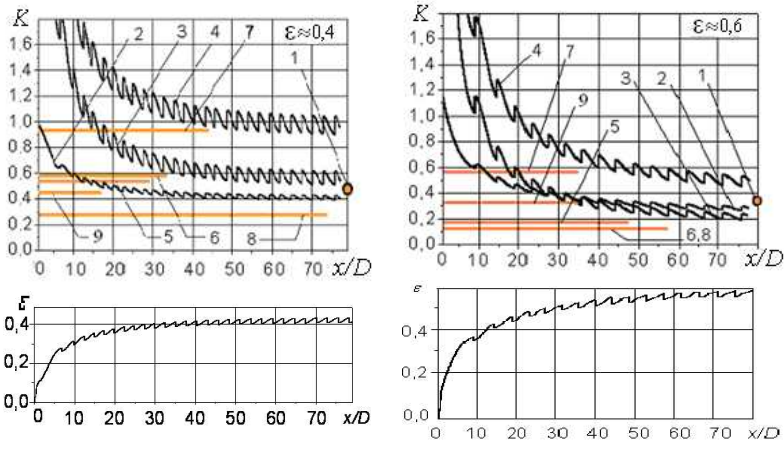
(2) ( \dots 2), [2] [8]

( \dots 3 4). \varepsilon

(11).

[6] [3] ( \dots 5 - 9), [7], [5], [4],

[1] ( \dots 1).



) )

. 3

2 . 4.

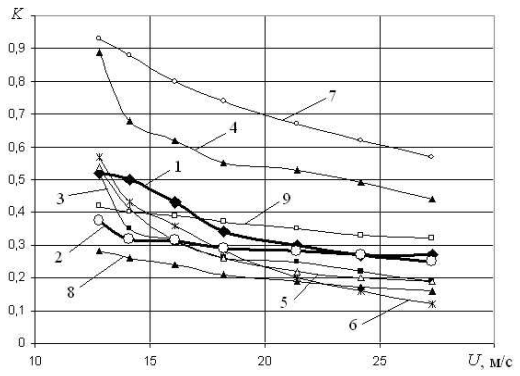
2

$U, /c$	[1]	- (10)	[2]	[8]	[3]	[6]	[4]	[7]	[5]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
12,8	0,52	0,38	0,52	0,89	0,54	0,57	0,93	0,28	0,42
14,1	0,5	0,32	0,35	0,68	0,41	0,47	0,88	0,26	0,40
16,1	0,43	0,31	0,31	0,61	0,31	0,36	0,81	0,23	0,39
18,2	0,34	0,29	0,26	0,55	0,26	0,28	0,74	0,21	0,37
21,4	0,30	0,28	0,25	0,53	0,22	0,20	0,67	0,19	0,35
24,2	0,27	0,27	0,22	0,49	0,20	0,16	0,62	0,17	0,33
27,3	0,27	0,25	0,19	0,44	0,19	0,12	0,57	0,16	0,32

. 4

2.

12,8 27,3 / .



. 4

[8]

[4]  
[7] –

[3],  
[2],

[6]

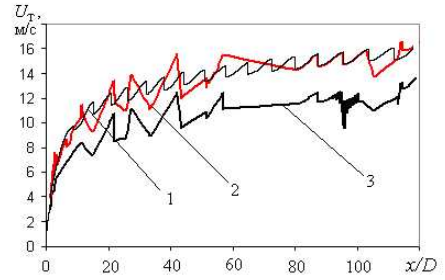
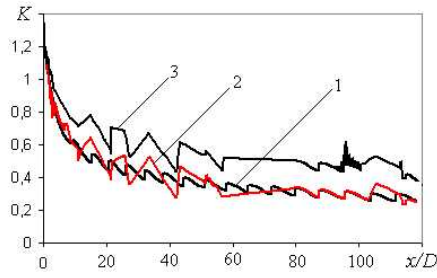
$$U = 27,3 \text{ /c}$$

. 5.

( 1)

$$k_n = 1 \text{ ( 2),}$$

$$k_n = 0,8 \text{ ( 3).}$$



. 5

1 2

( 3)

1. , 1927. 119 .
2. , 1954. 3. . 117–192.
3. , 1959. 197 .

