

УДК 532.529

*В. И. Коробко, И. Н. Малый,  
Л. Н. Макаренко, В. К. Шапшин, Л. Ф. Булгакова*

### РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТИЦ В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТАЛКИВАЮЩИХСЯ СТРУЯХ

*Определены параметры движения дискретных частиц в осесимметричных турбулентных встречных струях воздуха.*

Для интенсификации тепло- и массообмена в технологических процессах и аппаратах в настоящее время широкое распространение получил метод встречных струй [1]. Встречные струи воздуха весьма эффективны и для приготовления бетонных смесей [2]. Причем определяющим в струйном перемешивании бетонной смеси является автотельный участок разгона частиц песка и цемента с квадратичным законом сопротивления, начиная от плоскости встречи струй. В результате упругой деформации потока воздуха в местах ударного слияния струй и при наличии сил инерции частицы песка и цемента из одной струи проникают в другую и тормозятся в ней. Эти частицы разогнаться в противоположном направлении не успевают, так как в следующий момент времени соосность сопл-источников нарушается в силу конструктивных особенностей смесителя непрерывного действия для приготовления бетонных смесей [2].

В [1] при численном анализе процесса принято допущение, что скорость теплоносителя по всему тракту движения частицы остается постоянной, причем ее величина не превышает 30 м/с, за исключением плоскости встречи струй, где она равна нулю. В быстрых встречных потоках торможение потока происходит не скачкообразно, а в зоне, протяженность которой составляет 2—2,5 калибра выходного сечения трубопровода, отсчитываемой от плоскости встречи струй [3].

В [1] установлено, что межфазовый обмен во встречных струях интенсифицируется также за счет инерциальных эффектов, так как частица плотной фазы во встречных струях находится под непрерывным воздействием знакопеременного ускорения. Причем величина силы инерции зависит от значения градиента скорости  $dv_1/dx$  [4], которое в быстрых встречных потоках на два порядка выше, чем в медленных. Так, при анализе процесса в медленных встречных потоках [1] максимальное значение градиента скорости из всех исследованных режимов составляет  $dv_1/dx \sim 15 \text{ с}^{-1}$  ( $v_0 = 24,6 \text{ м/с}$ ,  $L = 1,6 \text{ м}$ ); в то время как для процесса в быстрых потоках, например, для бетонного смесителя [2]  $dv_1/dx \sim 1600 \text{ с}^{-1}$  ( $v_0 = 240 \text{ м/с}$ ,  $L = 0,15 \text{ м}$ ). Это свидетельствует о том, что в уравнении движения дискретной частицы в быстрых встречных потоках необходимо учитывать силу инерции при ускорении или торможении потока.

В настоящей работе выполнен численный расчет параметров движе-

ния дискретных частиц в осесимметричных турбулентных сталкивающихся струях методом встречных струй для быстрых потоков.

Задачу о соударении двух встречных струй можно рассматривать как задачу о прямом ударе струи в бесконечную плоскость ( $x=0$ ) (рис. 1). Струю воздуха, истекающую из сопла, можно рассматривать приближенно как свободную турбулентную струю и лишь вблизи тормозящей плоскости как уменьшающую свою скорость по закону струи, набегающей на плоскость.

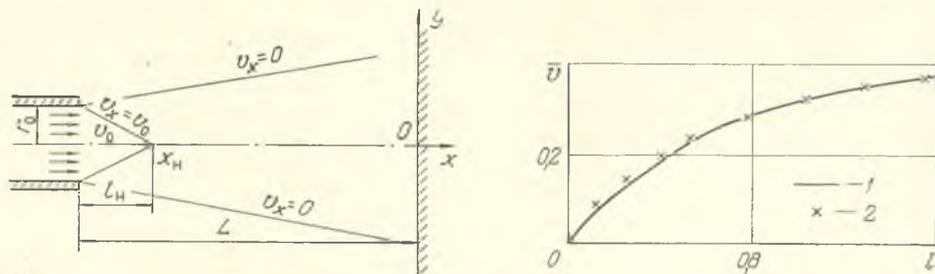


Рис. 1. Схема течения

Рис. 2. Распределение скорости  $\bar{v}$  дискретной частицы алюминия на длине участка торможения  $l$ , м во встречных потоках: 1 — расчет; 2 — эксперимент [1]

Рассмотрим истечение струи из сопла. Вблизи среза сопла имеется ядро постоянной скорости, т. е. скорость струи здесь равна скорости истечения ( $v_x = v_0$ ) (рис. 1). Длина начального участка осесимметричной затопленной струи на основе расчетных и экспериментальных данных [4] равна  $l = \frac{l_H}{r_0} \approx 10$ . Закон изменения осевой скорости струи представим в следующем виде [5]:

$$0,22(\bar{x} - \bar{x}_H) = 2,73 \left( \frac{1}{v_1} - 1 \right). \quad (1)$$

Так как расстояние между соплами равно  $2L$  (рис. 1), запишем явное выражение для осевой скорости затопленной струи воздуха:

$$\bar{v}_1 = 1 \text{ при } -\frac{L}{r_0} \leq \bar{x} \leq -\bar{x}_H, \quad (2)$$

$$\bar{v}_1 = [0,08(\bar{x} - \bar{x}_H) + 1]^{-1} \text{ при } -\bar{x}_H \leq \bar{x} \leq 0. \quad (3)$$

Осевая скорость струи должна при движении от сопла сначала изменяться как в свободной струе, а вблизи плоскости соударения меняться по закону струи, набегающей на плоскость. Поэтому скорость на оси сталкивающихся струй представим в виде [5]

$$\bar{v}_1 = f(\bar{x}) [0,08(\bar{x} - \bar{x}_H)]^{-1},$$

$$f(\bar{x}) = 1 + \frac{a}{x + \alpha} + \frac{b}{(x + \alpha)^2}, \quad (4)$$

( $a = 2,616$ ;  $b = -1,152$ ;  $\alpha = -3$ ).

Безразмерные коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$  выбирались из следующих условий: а)  $f(\bar{x}) = 0$  при  $\bar{x} = 0$ , т. е. требовалось, чтобы струя затормаживалась в плоскости соударения.

валась до нулевой скорости на плоскости соударения; б)  $d\bar{v}_1/d\bar{x} = -0,8$  при  $\bar{x}=0$ , т. е. чтобы кривая скорости  $\bar{v}_1(\bar{x})$  подходила к нулю при  $\bar{x}=0$  с тем же угловым коэффициентом, как и у осесимметричной струи, ударяющейся в плоскость; в) скорость струи при удалении от плоскости соударения должна стремиться к скорости свободной турбулентной струи.

Таким образом, формула (4) дает закон поведения скорости вдоль оси осесимметричных сталкивающихся струй.

Уравнение установившегося движения сферической частицы вдоль оси осесимметричных сталкивающихся струй в подвижной системе координат, неизменно связанной с частицей в безразмерном виде:

$$\bar{v} \frac{d\bar{v}}{d\bar{x}} = \frac{2\rho_1}{\rho + \rho_1} \left\{ \frac{3}{8} \frac{r_0}{d} |\bar{v} - \bar{v}_1| (\bar{v} - \bar{v}_1) + (\bar{v}_1 - \frac{1}{2}\bar{v}) \frac{d\bar{v}_1}{d\bar{x}} \right\}. \quad (5)$$

Это уравнение получено из уравнения Чена [4], которое записано в подвижных координатах  $\left(\frac{d}{dt} = \frac{V_1 d}{dx}\right)$ . Причем в первом члене справа

в отличие от [4] взята квадратическая зависимость силы сопротивления от скорости согласно [1]. При этом сила сопротивления направлена против движения, если твердая частица опережает поток, и по движению, если частица отстает от потока. Принято также  $c_x = 0,5$ . Второй член справа определяет силу инерции при ускорении или торможении потока. Величина этого члена весьма существенна для процесса в быстрых встречных потоках, о чем нами уже упоминалось. При выходе струи из сопла до конца начального участка струи ( $x = x_n$ ) осевая скорость  $v_1 = v_0$  (формула (2)), и при дальнейшем движении к плоскости встречи струй скорость  $v_1$  уменьшается по закону, описываемому формулой (4). Задавая значения начальных параметров, уравнение (5) численно интегрируем в интервале  $-x_n \leq x \leq 0$  (рис. 1) методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности на ЭВМ М-220М.

На рис. 2 представлено сравнение результатов расчета и измерений [1] распределения скорости  $\bar{v} = v/v_0$  дискретной частицы алюминия ( $\rho = 2970 \text{ кг/м}^3$ ,  $d = 2,25 \text{ мм}$ ,  $Re = 1760$ ) по длине участка торможения  $l$  в медленных встречных потоках ( $v = 21,7 \text{ м/с}$ ,  $v_0 = 11,8 \text{ м/с}$ ).

Был выполнен расчет 60 вариантов движения дискретных частиц песка и цемента в быстрых встречных струях воздуха ( $v_0 = 240 \text{ м/с}$ ) при его постоянной плотности  $\rho_1 = 2,33 \text{ кг/м}^3$  и следующих параметрах: плотность песка  $\rho_{п} = 2650 \text{ кг/м}^3$ ; плотность цемента  $\rho_{ц} = 3200 \text{ кг/м}^3$ ; диаметр песчинок  $d_{п} = 1; 2 \text{ мм}$ ; диаметр частиц цемента  $d_{ц} = 0,005; 0,035; 0,06 \text{ мм}$ ; безразмерная начальная скорость ввода частиц песка и цемента в струю  $\bar{v}_{п} = 0,01; 0,1; 0,3; 0,5$ ; местоположение ввода частиц  $\bar{x}_0 = x/L = -0,85; -0,44; -0,15$ ;  $r_0 = 4 \text{ мм}$ .

На рис. 3, а, б представлены динамические характеристики частиц песка и цемента разной крупности с различной начальной скоростью ввода и разным начальным положением ввода частиц вдоль оси струи. Здесь же нанесено изменение скорости струи вблизи плоскости соударения (штриховая кривая). Из рис. 3, а видно, что частицы песка, разгоняясь в начале движения, в дальнейшем мало меняют свою скорость, лишь немного уменьшая ее вблизи плоскости соударения струй, и чем больше диаметр частицы (т. е. ее вес), тем до меньших скоростей она разгоняется. При увеличении начальной скорости ввода частицы песка в струю (кривые 5—8) ее скорость почти не меняется и слабо зависит от диаметра частицы, т. е. частица песка, обладая большой инерцией, слабо реагирует на замедление воздушной струи. Чем дальше от сопла части-

ца песка попадает в струю, тем до меньших скоростей она успевает разогнаться, так как скорость струи замедляется.

Из рис. 3, б видно, что частицы цемента разгоняются быстрее, достигают максимальной скорости струи и замедляются под действием тормозящей струи воздуха. Частицы цемента, обладая малым диаметром (т. е. весом), а поэтому и малой инерцией по сравнению с частицей песка, быстро реагируют на изменение скорости струи, и чем больше диаметр частиц (вес), тем слабее частица цемента реагирует на изме-

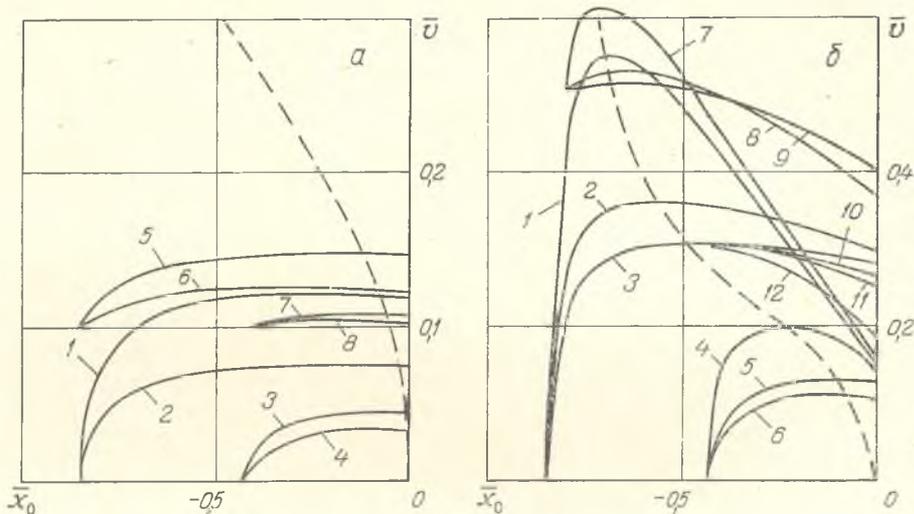


Рис. 3. Изменение скорости частиц песка (а) и цемента (б) разной крупности вдоль оси сталкивающихся струй: а — 1, 3, 5, 7 —  $d_p=1$  мм; 2, 4, 6, 8 —  $d_p=2$  мм; б — 1, 4, 7, 10 —  $d_c=0,005$  мм; 2, 5, 8, 11 —  $d_c=0,035$  мм; 3, 6, 9, 12 —  $d_c=0,06$

нение скорости в струе. Чем дальше от сопла вводится в струю частица цемента, тем до меньших скоростей она разгоняется. При увеличении начальной скорости ввода частицы цемента (кривые 7—9, 10—12) заметнее сказывается инерция частиц: чем частица тяжелее, тем слабее реагирует на изменение скорости струи.

На рис. 4 дана зависимость скорости частиц песка и цемента в плоскости встречи струй от крупности частиц. Если для песка скорость соударения монотонно падает с увеличением диаметра частицы, то для цемента сначала наблюдается рост скорости в плоскости соударения и лишь при  $d > 0,03$  мм скорость немного убывает. Относительная скорость лобового соударения ( $2v$ ) частиц не превосходит  $0,6 \cdot v_0 = 144$  м/с.

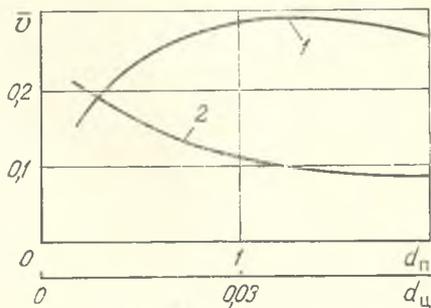


Рис. 4. Скорость частиц песка и цемента разной крупности в плоскости соударения струй при  $x_0=-0,85$ ,  $\bar{v}_n=0$ : 1 — цемент; 2 — песок,  $d_p, d_c$ , мм

Рассмотренное струйное перемешивание позволяет готовить бетонную смесь заданных технологических параметров за счет высоких скоростей перемешивания в отличие от существующих способов приготовления бетонных смесей [6].

### Обозначения

$x, y$ —координаты (рис. 1);  $v_x$ —скорость струи;  $v_0$ —максимальная скорость струи;  $r_0$ —радиус сопла;  $l_n$ —длина начального участка струи;  $L$ —расстояние между соплом и плоскостью соударения;  $\bar{x}$ —безразмерная координата, отнесенная к радиусу сопла;  $\bar{x}_n$ —безразмерная длина начального участка, отнесенная к радиусу сопла;  $d$ —диаметр частицы;  $\rho_1$ —плотность струи;  $\rho$ —плотность частицы;  $c_x$ —коэффициент сопротивления частицы;  $v$ —скорость частицы;  $v_1$ —осевая скорость струи;  $\nu$ —кинематический коэффициент вязкости потока;  $\bar{x}_0$ —безразмерная координата, отнесенная к расстоянию  $L$ ;  $d_c$ —диаметр частицы цемента;  $d_n$ —диаметр частицы песка;  $\bar{v}_n$ —безразмерная скорость ввода частицы в струю, отнесенная к  $v_0$ .

### Nomenclature

$x, y$ , coordinates (Fig. 1);  $v_x$ , jet velocity;  $v_0$ , maximum jet velocity;  $r_0$ , nozzle radius;  $l_n$ , jet starting length;  $L$ , distance between the nozzle and impinging plane;  $\bar{x}$ , dimensionless coordinate based on the nozzle radius;  $\bar{x}_n$ , dimensionless starting length based on the nozzle radius;  $d$ , particle diameter;  $\rho_1$ , jet density;  $\rho$ , particle density;  $c_x$  particle resistance coefficient;  $v$ , particle velocity;  $v_1$ , axial jet velocity;  $\nu$ , kinematic viscosity coefficient;  $\bar{x}_0$ , dimensionless coordinate based on the  $L$  distance;  $d_c$ , cement particle diameter;  $d_n$ , sand particle diameter;  $\bar{v}_n$ , dimensionless velocity of the injected particle based on  $v_0$ .

### Figure Captions

Fig. 1. Flow pattern.

Fig. 2. Velocity distribution,  $\bar{v}$ , of a discrete aluminium particle along the stagnation length,  $l$ , in the counterflows: 1, calculation; 2, experiment [1].

Fig. 3. Velocity change in different-size particles of sand (a) and cement (b) along the impinging jet axis.

Fig. 4. Velocity of different-size sand and cement particles in the impinging jet plane at  $\bar{x}_0 = -0,85$ ,  $\bar{v}_n = 0$ : 1, cement; 2, sand.

### Summary

The problem of moving sand and cement particles in axisymmetric turbulent impinging air jets is solved numerically.

### Литература

1. Эльперин И. Т., Мельцер В. Л., Павловский Л. Л., Енякин Ю. П. Процессы переноса во встречных струях. Минск, Наука и техника, 1972.
2. Королев К. М., Малый И. Н. и др. Изв. вузов. Строительство и архитектура, № 6, 1973.
3. Милн-Томсон Л. М. Теоретическая гидромеханика. М., Мир, 1964.
4. Хинце Н. О. Турбулентность. М., Наука, 1963.
5. Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. М., Наука, 1976.
6. Королев К. М. Интенсификация приготовления бетонной смеси. М., Стройиздат, 1976.

[29.I 1979 г.]

Новополоцкий политехнический институт