

УДК [622.822.7:622.647.2]:614.844.5

*Е.В. Курбацкий, канд. техн. наук, ведущий технолог,  
И.А. Потапенко, завотделом НИИГД «Респиратор»*

## ПАРАМЕТРЫ ПЕННОЙ СТРУИ С ПЕРЕМЕННЫМ РАСХОДОМ ВДОЛЬ ПУТИ ДВИЖЕНИЯ

Используя уравнение движения переменной массы и скорости в осевом направлении для плоскопараллельного случая с учетом сжимаемости гетерогенной среды, получено выражение изменения продольной координаты, позволяющее определить параметры пенной струи на примере установки пенного пожаротушения линейной части ленточного конвейера.

**Ключевые слова:** пенная струя, плоскопараллельный случай, плотность, параметры, установка пенного пожаротушения.

Одной из основных технических характеристик автоматической установки пожаротушения линейных секций ленточных конвейеров является длина непрерывной зоны защиты, которая зависит от длины струй, образующихся при дискретном отсоединении пенного потока из трубопроводной части установки.

Вопросам исследований параметров пенных струй, в отличие от газожидкостных, посвящено незначительное количество работ, в которых рассмотрены в основном осесимметричные сплошные струи, вытекающие из оросителей круглого поперечного сечения без учета физических явлений, характерных для таких сред [2].

Для орошения конвейерной ленты с более близкого расстояния от начала выхода оросители для пенных струй по ширине сечения выполнены в виде прямоугольных щелей.

При истечении из оросителей струя эжектирует окружающий воздух и за счет энергии сжатия пенного потока расширяется. При этом происходит разрушение сплошного потока и образуются три различные зоны струйного течения. Потенциальное ядро струи состоит из неразрушенного пенного потока, не имеющего разобренных границ. К нему примыкает внутренний подслой, где происходит разрушение потока и частично эжектируется воздух, преобладающий во внешнем подслое, в котором дисперсной фазой служат частицы пены. Как отмечено в работе [1], такой струе, как и однородной, должна быть присуща перемежаемость турбулентности. Границы раздела турбулентной и нетурбулентной зон происходят в подслое. Эти границы не являются фиксированными, в силу чего необходимо выделить условную границы струи. Задача осложняется тем, что сжатая пена

на выходе из оросителя обладает поперечным градиентом давления и, вследствие этого, внешний подслои вблизи оросителя резко расширяется, частично теряя массу [3].

**Цель работы** – определить параметры пенной струи с переменным расходом вдоль пути движения. Для этого будет использована характеристика работы автоматической установки пожаротушения линейной части ленточных конвейеров.

**Изложение материала исследований.** В процессе распыления пенной струи происходит присоединение воздуха к образованным пенным фракциям и, следовательно, в этом случае движение гетерогенной струи необходимо рассматривать как движение с переменным расходом вдоль пути [4].

Уравнение Мещерского для элемента струи в проекции на ось  $Y$ , направленную по вертикали, имеет вид [1]

$$m \frac{dV_c}{dt} = y + \frac{dm}{dt} (V_n - V_c), \quad (1)$$

где  $V_c$  – поперечная компонента скорости движения элемента струи, м/с;

$t$  – время, с;

$y$  – проекция на ось  $Y$  приложенной силы, Н;

$m$  – масса элемента струи, кг;

$V_n$  – поперечная составляющая скорости присоединяющейся массы, м/с.

В дальнейшем считаем  $V_n = 0$ , что верно для осесимметричной и плоскопараллельной струй.

Материальная производная по времени от  $V_c$  :

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{\partial V_c}{\partial t} + U_c \frac{\partial V_c}{\partial x} + V_c \frac{\partial V_c}{\partial y}, \quad (2)$$

где  $U_c$  – продольная компонента скорости движения элемента струи, м/с;

$x$  – текущее значение продольной координаты, м.

Для стационарного процесса  $V_c$  не зависит от  $t$ , то есть

$$\frac{\partial V_c}{\partial t} = 0. \quad (3)$$

Так как граница струи  $V_c = 0$ , то в самой струе  $V_c$  имеет порядок  $\delta = \frac{b_1}{L}$ ,

где  $b_1$  – толщина струи, м;

$L$  – характерный линейный размер по оси  $X$ , м, а величины  $U_c, \frac{\partial V_c}{\partial x}, \frac{\partial V_c}{\partial y} \sim 1 \gg \delta$ .

Тогда

$$V_c \frac{\partial V_c}{\partial y} = 0. \quad (4)$$

С учетом вышеизложенного из уравнения (2) получим

$$\frac{dV_c}{dt} = U_c \frac{\partial V_c}{\partial x}. \quad (5)$$

В соответствии с одномерной постановкой задачи для плоскопараллельного потока масса элемента струи и проекция силы  $Y$  примут вид

$$\left. \begin{aligned} m &= \rho_c b_1 b_2 \Delta x; \\ Y &= (\rho_c - \rho_H) g b_1 b_2 \Delta x, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\rho_c$  – плотность элемента струи, кг/м<sup>3</sup>;

$b_1, b_2$  – толщина и ширина струи в сечении  $x$  соответственно, м;

$\Delta x$  – длина элемента струи, м;

$\rho_H$  – плотность окружающего воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Исследованиями, проведенными в реальных условиях конвейерной выработки Кировского рудника ПО «Апатит» при испытаниях экспериментального образца автоматической установки пожаротушения линейных секций ленточного конвейера, установлено, что закон изменения толщины и ширины данной струи можно представить в виде

$$b_1 = c_1 = h; \quad b_2 = \frac{b + c_2 x}{x + 1}; \quad (7)$$

$$c_2 = 3,25 (1 + 2,6 \cdot 10^{-2} b), \quad (8)$$

где  $h$  – расстояние по вертикали от оросителя до поверхности верхней ветви ленты, м;

$b$  – ширина насадка, м;

$c_2$  – коэффициент, полученный экспериментальным путем.

В дальнейшем, при выводе уравнения для определения длины струи в связи с относительно малой шириной оросителя и упрощения вывода уравнения, примем  $b = 0$ :

$$b_2 = c_2 \frac{x}{1+x}; \quad c_2 = 3,25 \quad (9)$$

Тогда выражения (6) примут вид

$$m = \rho_c c_1 c_2 \frac{x}{x+1} \Delta x; \quad (10)$$

$$y = (\rho_c - \rho_H) g c_1 c_2 \frac{x}{x+1} \Delta x. \quad (11)$$

Уравнение (1) с учетом (4) и (5) можно записать

$$\frac{d}{dx}(mV_c) = \frac{y}{U_c} \quad (12)$$

при начальном условии  $V_c = 0, \quad x = 0. \quad (13)$

Решая уравнение (12), получим

$$V_c = \frac{1}{m_0} \int_0^x \frac{y}{U_c} dx. \quad (14)$$

Продольная составляющая скорости движения струи  $U_c$  для плоско-параллельного случая согласно [1] имеет вид

$$U_c = \frac{1,2U_0}{\left[ \frac{ax}{b_0} + 0,41 \right]^{1/2}}, \quad (15)$$

где  $U_0$  – начальная скорость струи, м/с;

$b_0$  – полуширина начального сечения струи, м;

$a$  – экспериментальная константа, зависящая от структуры потока в начальном сечении.

На большом расстоянии  $x$  от насадка выражение для  $U_c$  с учетом скорости и направления воздушной струи  $W$  можно записать в следующем виде:

$$U_c \approx \frac{1,2(U_0 \pm W) \left(\frac{b_0}{a}\right)^{1/2}}{x^{1/2}} = \frac{c_3}{x^{1/2}}, \quad (16)$$

где  $c_3 = 1,2(U_0 \pm W) \left(\frac{b_0}{a}\right)^{1/2}$  – коэффициент, полученный на основании экспериментальных исследований.

Используя (10) и (11), выражение (14) можем записать так:

$$V_c = \frac{(x+1)g}{\rho_c x} \int_0^x \frac{(\rho_c - \rho_H)x^{3/2}}{(x+1)U_c} dx. \quad (17)$$

Воспользовавшись зависимостью

$$\frac{\rho_c - \rho_H}{\rho_0 - \rho_H} = \frac{U_c}{U_0},$$

предложенной в работе [4], получим

$$V_c = \frac{g(x+1)}{x^{1/2}c_3(1+\alpha)} \int \frac{x^{3/2}}{x+1} dx = \frac{g(x+1)}{x^{1/2}c_3(1+\alpha)} \left( x^{3/2} - 3x^{1/2} + 3 \operatorname{arctg} x^{1/2} \right), \quad (18)$$

где 
$$\alpha = \frac{\rho_H x^{1/2}}{c_3(\rho_0 - \rho_H)}. \quad (19)$$

Поперечная составляющая скорости движения

$$V_c = \frac{dy_c}{dt} = U_c \frac{dy_c}{dx},$$

откуда

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{V_c}{U_c} = \frac{2}{3} \frac{g(x+1)}{c_3^2(1+\alpha)} \left( x^{3/2} - 3x^{1/2} + 3 \operatorname{arctg} x^{1/2} \right). \quad (20)$$

Максимальное значение  $a$  (при максимальных значениях длины струи и минимальных плотности и начальной скорости пенного потока) составляет не более 10 % от единицы, поэтому принимаем  $a = 0$ . Тогда

$$y_c = \frac{2g}{3c_3^2} \int (x+1)(x^{1/2} - 3x^{1/2} + 3 \operatorname{arctg} x^{1/2}) dx. \quad (21)$$

После интегрирования выражения (21) и определения постоянной интегрирования при условии  $y_c|_{x=0} = 0$  получим

$$y_c = \frac{g}{45c_3^2} \left[ x^{1/2} (12x^5 - 40x^3 - 225x - 45) + 45 \operatorname{arctg} x^{1/2} (x^2 + 1) \right]. \quad (22)$$

Согласно работе [1] коэффициент структуры для плоскопараллельной струи  $a = 0,10 \dots 0,11$ . Принимая значение  $a = 0,1$ , выражение (22) запишем в виде

$$y_c = 1,51 \cdot 10^{-2} \left[ (U_0 \pm W)^2 b \right]^{-1} \left[ x^{1/2} (12x^5 - 40x^3 - 225x - 45) \right]. \quad (23)$$

**Вывод.** Зная ширину проходного сечения оросителя, скорость выхода пенного потока из оросителя и скорость вентиляционной струи, расстояние от оросителя до конвейерной ленты, по формуле (23) можно определить максимальную длину каждой пенной струи, а следовательно, и суммарную длину зоны защиты всей установкой пожаротушения линейной части ленточного конвейера.

#### Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Турбулентные свободные струи жидкостей и газов / Г.Н. Абрамович. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 288 с.
2. Качалов А.А. Гидравлические сопротивления при движении воздушно-механической пены по трубопроводам и пенные струи: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Качалов. – М., 1970. – 160 с.
3. Курбацкий Е.В. Автоматические водопенные средства ликвидации пожаров на всем протяжении подземных ленточных конвейеров: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 / Е.В. Курбацкий. – Макеевка, 1988. – 239 с.
4. Накорчевский А.И. Гетерогенные турбулентные струи / А.И. Накорчевский. – Киев: Наукова думка, 1980. – 143 с.

Получено 18.04.2011