

УДК 677.021.17

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАШЕНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ ВЯЗКОУПРУГИХ ПЛЕНОК

Н.Е.ЕГОРОВА, С.Г.СИДОРОВ, Ф.Н.ЯСИНСКИЙ

**(Ивановская государственная текстильная академия,
Ивановский филиал Российского государственного торгово-экономического университета)**

Работа центробежных и вихревых пылеуловителей связана с возникновением турбулентных вихрей, отрицательно влияющих на эффективность пылеулавливания. Математическое моделирование поведения частицы пыли вследствие случайного характера турбулентных пульсаций представляет очевидные трудности. Задача нахождения эффективного способа гашения турбулентных пульсаций является актуальной – снижение турбулентности позволит уменьшить сопротивление и энергозатраты.

Одним из способов уменьшения турбулентности является, например, снижение скорости подачи запыленного воздуха. Не-

достаток такого способа гашения турбулентности заключается в малой пропускной способности сепаратора, а значит в больших потерях во времени.

Процесс движения запыленного воздуха в трубопроводах также связан с возникновением турбулентных пульсаций.

Сделано предположение о том, что возможно частичное гашение турбулентности с помощью натянутых внутри трубопровода вязкоупругих пленок.

Пусть имеется воздуховод прямоугольного сечения. Для гашения турбулентности по одной из стенок натянем полиэтиленовую пленку. Рассмотрим осевое сечение воздуховода. Опишем процесс движе-

ния воздуха в отрезке трубы длиной L .

Каждый из турбулентных вихрей, возникающих в трубопроводе, можно рассматривать как физическое тело, обладающее определенной массой и скоростью. Рассмотрим один такой вихрь. Пусть он обладает массой m_0 и движется по трубе со скоростью \bar{V} . Скорость движения вихря \bar{V} во взятом сечении можно разложить на две составляющие: продольную скорость \bar{V}_x и радиальную \bar{V}_y , то есть

$$\bar{V} = \bar{V}_x + \bar{V}_y.$$

Таким образом, вихрь движется по сечению как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Местонахождение вихря передают координаты x и y .

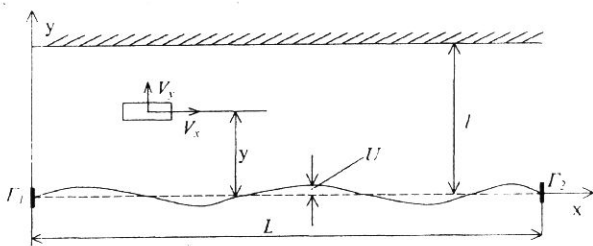


Рис.1

Как видно из рис. 1, пленка натянута по нижней стенке трубы при $y=0$. Обозначим через U отклонение пленки от положения равновесия.

Когда вихрь соприкасается с пленкой, между ними возникает сила взаимодействия $F_{вз}$, направленная для вихря вверх, а для пленки – вниз.

Пусть эта сила будет равна

$$F_{вз} = \frac{\alpha}{\epsilon + |y - U|^n}, \quad (1)$$

где ϵ , α , n – эмпирические константы, причем ϵ близка к нулю.

Выбор этого выражения объясняется тем, что даже при незначительном удалении вихря от пленки между ними не должно быть взаимодействия. И действительно, если $y \rightarrow U$, то $F_{вз}$ возрастает и, наоборот, при отдалении y от U $F_{вз}$ становится прак-

тически равной нулю.

С учетом силы взаимодействия $F_{вз}$ волновое уравнение, описывающее колебания пленки, имеет вид

$$\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial U}{\partial t} - \frac{F_{вз}}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – погонная плотность пленки; c – скорость распространения упругой волны ($c^2 = \frac{T}{\rho}$); μ – удельная вязкость пленки; T – натяжение пленки.

Уравнение движения вихря

$$m_0 \frac{d^2 y}{dt^2} = F_{вз}. \quad (3)$$

Поскольку радиальная скорость $V_y = \frac{dy}{dt}$, то (3) можно также представить в виде

$$m_0 \frac{dV_y}{dt} = F_{вз}.$$

Цель математического эксперимента состоит в следующем: узнать, как со временем изменяется по абсолютному значению радиальная скорость вихря.

Для этого задается величина $V_{y \text{ нач}}$ и промежуток времени t_{max} , за который будут вычисляться передвижения вихря и его взаимодействия с гасителем. Спустя время t_{max} , получаем значение $V_{y \text{ кон}}$. Затем значения $V_{y \text{ нач}}$ и $V_{y \text{ кон}}$ сравниваются. Вычисления повторяются при различных технологических показателях пленки: ρ , c , μ . Таким образом, подбираются такие технологические характеристики пленки, при которых уровень гашения турбулентности будет наивысшим.

Полученная система уравнений решалась методом Эйлера.

Отрезок с границами Γ_1 и Γ_2 был разбит на n равных частей. Длина разбиения обозначена через h (рис. 2).

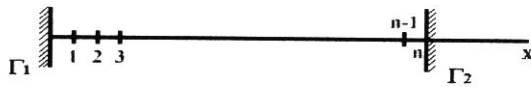


Рис. 2

Уравнения в конечно-разностной схеме приняли вид

$$F_{вз\ i}^k = \frac{\alpha}{\varepsilon + |y^k - U_i^k|^2}, \quad (4)$$

$$\frac{U_i^{k+1} - 2U_i^k + U_i^{k-1}}{\tau^2} = c^2 \frac{U_{i+1}^k - 2U_i^k + U_{i-1}^k}{h^2} - \frac{\mu}{\rho} \frac{U_i^{k+1} - U_i^k}{\tau} - \frac{F_{вз\ i}^k}{\rho}, \quad (5)$$

$$m_0 \frac{\bar{V}_y^{k+1} - \bar{V}_y^k}{\tau} = F_{вз\ i}^k, \quad (6)$$

$$U_i^{k+1} = \frac{\left(2 - 2\left(\frac{c\tau}{h}\right)^2 - \frac{\mu\tau}{\rho}\right)U_i^k - U_i^{k-1} + \left(\frac{c\tau}{h}\right)^2(U_i^{k+1} - U_i^k) - \frac{\tau^2}{\rho}F_{вз\ i}^k}{1 + \frac{\mu\tau}{\rho}}, \quad (10)$$

$$\bar{V}_y^{k+1} = \bar{V}_y^k + \frac{\tau}{m_0}F_{вз\ i}^k. \quad (11)$$

Таким образом, требуется решение системы (4), (7...11). К системе добавляются условия:

– если вихрь достигает верхней стенки, то его поперечная скорость меняет знак, то есть:

$$\text{если } y^{k+1} > \ell, \text{ то } \bar{V}_y^{k+1} = -|\bar{V}_y^{k+1}| \text{ и } y^{k+1} = y^k + \tau\bar{V}_y^{k+1};$$

– начальные:

пленка находится в состоянии покоя, то есть $U_i^0 = 0, \quad i = 0, \dots, n$;

вихрь располагается в центре трубы, то есть $y^0 = \ell/2$;

– граничные: $U|_{\Gamma_1} = U_0 = 0, \quad U|_{\Gamma_2} = U_n = 0$.

Задачу решали численными методами на ЭВМ. Разработана специальная про-

$$t^{k+1} = t^k + \tau. \quad (7)$$

В связи с тем, что вихрь перемещается и вдоль трубы, его новое расположение по оси абсцисс находится по формуле

$$x^{k+1} = x^k + \tau\bar{V}_x. \quad (8)$$

Для формулы (6) индекс i определяли с помощью выражения

$$i = \text{round}\left(\frac{x^{k\ n}}{L}\right). \quad (9)$$

Чтобы разностная схема стала явной, (5) и (6) преобразовали к виду

грамма, моделирующая турбулентный поток и работу гасителя. В результате получено, что при некотором натяжении пленки достигается наибольшее гашение турбулентности.

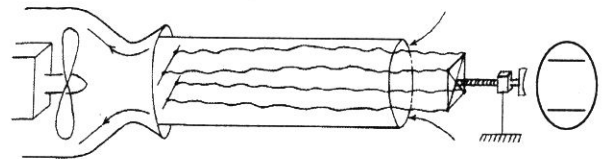


Рис. 3

С целью тестирования метода гашения турбулентных возмущений создана экспериментальная установка, моделирующая движение воздушных потоков на входе в сепаратор. Модель представляет собой горизонтально расположенную аэродинами-

ческую трубу с вентилятором, работающим на всасывание воздушного потока (рис.3). Ко входу примонтирована двухметровая металлическая труба диаметром 32 см.

Для гашения турбулентных пульсаций внутри трубы натянуты ленты из полиэтиленовой пленки. Турбулентные вихри, сталкиваясь с упругой вязкой стенкой, отражаются от нее с меньшей скоростью, то есть происходит гашение пульсаций воздуха.

В целях наиболее эффективного гашения турбулентности необходимо правильно подобрать технологические параметры гасителя (упругость, вязкость, масса и натяжение). В качестве опытного материала использовали полиэтилен ($\rho = 15,2 \cdot 10^{-3}$ кг/пог. м). Внутри трубы по стенкам протянули две полиэтиленовые пленки, имелось приспособление для регулировки ее натяжения.

Цель эксперимента сводилась к измерению радиальной составляющей скорости воздушного потока при разном натяжении пленок (от 0 до 50 Н).

Внутри трубы был помещен электродинамический микрофон. Настройка датчика велась с использованием осциллографа С-94. При помощи микрофона на магнитную ленту записывали воздушные шумы. Затем запись обрабатывали на ЭВМ с использованием прикладной программы, позволяющей оценить уровень турбулентных пульсаций.

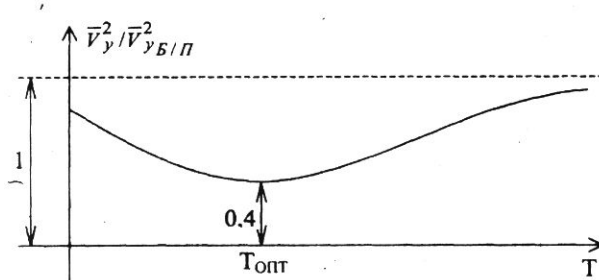


Рис. 4

График зависимости квадрата скорости пульсаций от натяжения пленки представлен на рис. 4.

В результате при некотором натяжении пленки получено максимальное гашение турбулентных вихрей (на 40% по сравнению с уровнем пульсаций в трубе без пленки).

ВЫВОДЫ

Предложен способ снижения уровня турбулентных пульсаций с помощью использования вязкоупругих пленок. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность разработанного способа.

Рекомендована кафедрой прикладной математики и информационных технологий. Поступила 03.03.03.