

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ПРИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОМ УПЛОТНЕНИИ ВОЛОКНА В НИЖНЕЙ ШАХТЕ ДВУХКАМЕРНОГО БУНКЕРНОГО ПИТАТЕЛЯ

А.П. БАШКОВ, В.Д. ФРОЛОВ

(Ивановская государственная текстильная академия)

После формирования волокнистого столба в верхней шахте 1 (рис.1) двухкамерного бункерного питателя волокно подается к разрыхляющему барабану 2 и сбрасывается им в нижнюю шахту 3, где происходит окончательное формирование питающего волокнистого настила 4. Уплотнение волокна осуществляется воздушным потоком, создаваемым центробежным вентилятором 5, предусмотренным в конструкции питателя.

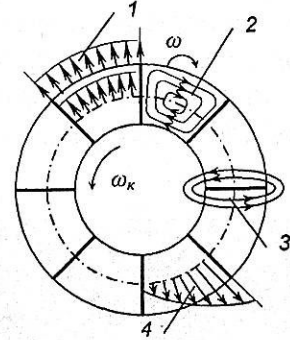


Рис. 2

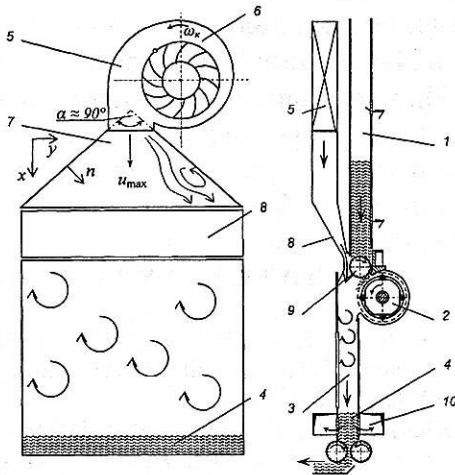


Рис. 1

Предполагается, что вентилятор создает воздушный поток с более постоянным давлением и равномерным распределением поля вектора скорости по сравнению с транспортирующим потоком в питающем канале, уплотняющим волокно в верхней шахте. Наблюдения за работой питателя [1] показали, что в нижней шахте имеет место вихревое движение клочков волокна во время формирования настила, а также происходят колебания давления воздуха, что приводит к неравномерному уплотнению волокнистого слоя и образованию структурной неровности полуфабриката.

Рассмотрим работу центробежного вентилятора. Известно, что в канале между лопатками рабочего колеса существуют три вида течений (рис. 2): поступательное течение 1 в радиальном направлении от центра к периферии, циркуляционное течение 2, обусловленное инерцией среды и вращающееся относительно колеса с угловой скоростью ω , приблизительно равной скорости колеса ω_k , но имеющей обратное направление, циркуляционное течение 3 вокруг лопатки, обусловленное разностью давлений на рабочей и тыловой поверхностях лопатки.

Течение 2 вызывает явление скоса потока, то есть отклонение скоростей от радиального направления в обратную относительно вращения колеса сторону, что совместно с инерционными силами прижимает воздух к периферийной стенке кожуха вентилятора и диффузора. Течение 3 незначительно сглаживает этот эффект. Суммарная диаграмма скоростей 4 этих течений трех видов указывает на неравномерное распределение поля вектора скорости на выходе из колеса. Это приводит к тому, что образованные в межлопастных каналах макровихри сохраняются на выхо-

де из вентилятора. Размер вихря обусловлен расстоянием между лопатками колеса [2].

Установившееся движение несжимаемого потока в секторе спиральной камеры 6 (рис.1) в полярных координатах можно записать в виде системы уравнений:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + v_{\text{eff}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial u_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right) &= u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_r}{\partial z} - \frac{u_\tau^2}{r}, \\ v_{\text{eff}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial u_\tau}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\tau}{\partial z^2} \right) &= u_r \frac{\partial u_\tau}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_\tau}{\partial z} - \frac{u_\tau u_r}{r}, \\ -\frac{\partial \hat{p}}{\partial r} + v_{\text{eff}} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial z^2} \right) &= u_r \frac{\partial u_z}{\partial r} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\hat{p} = \frac{p}{\rho}$ – давление, отнесенное к плотности; $\frac{\partial \hat{p}}{\partial z}$ и $\frac{\partial \hat{p}}{\partial r}$ – постоянные градиенты давления, направленные вдоль оси и радиуса сектора спиральной камеры соответственно; u_z, u_τ, u_r – осевая, тангенциальная и радиальная составляющие скорости, определяемые как функции радиуса r и осевой координаты z .

Уравнение неразрывности в этом случае будет:

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} - \frac{u_\tau}{r} = 0. \quad (2)$$

Для вычисления давления можно воспользоваться способом слабой сжимаемости [3], заменив уравнение неразрывности следующим:

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} = \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} \right) - c^2 \left(\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{u_r}{r} \right), \quad (3)$$

где c^2 – некоторая положительная константа.

Турбулентность может быть описана следующими уравнениями:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + u_r \frac{\partial K}{\partial r} + u_z \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial K}{\partial r} + \frac{\partial K}{\partial z} \right) + S_K, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_r \frac{\partial E}{\partial r} + u_z \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{\partial E}{\partial z} \right) + S_E. \quad (5)$$

Здесь

$$v_{\text{eff}} = v_\mu + v_{\text{turb}}, \quad (6)$$

$$v_{\text{turb}} = c_\mu \frac{K^2}{E}; \quad (7)$$

$$S_K = v_\mu D - E; \quad (8)$$

$$S_E = (c_1 D - c_2 E) \frac{E}{K}, \quad (9)$$

где K – кинетическая энергия турбулентных пульсаций; E – скорость диссипации кинетической энергии в этих пульсациях; v_{eff}, v_μ и v_{turb} – коэффициенты кинематической вязкости, соответственно, эффективной, молекулярной и турбулентной; D – величина, оценивающая интенсивность деформации среды вблизи неподвижной

твердой стенки корпуса вентилятора, она определяется как:

$$D = \left| \frac{\partial u_\tau}{\partial r} \right| \quad (10)$$

Согласно [3] постоянные $c_\mu=0,09$; $c_1=1,44$; $c_2=1,92$; $\sigma_K=1$; $\sigma_E=1,3$.

Для расчетов в качестве начальных условий можно принять:

$$K_0 = c_K \sum_j u_j^2; \quad E_0 = c_E K^{3/2}, \quad (11)$$

где c_K и c_E – некоторые малые положительные величины.

Граничные условия на твердых поверхностях (у стенок корпуса) будут:

$$\left. \frac{\partial K}{\partial r} \right|_\Gamma = 0; \quad \left. \frac{\partial E}{\partial r} \right|_\Gamma = 0. \quad (12)$$

Таким образом, в диффузоре 7 (рис.1) на выходе из вентилятора образуется турбулентное течение, вызывающее пульсацию действительной скорости, с искривленным профилем вектора скорости.

При движении потока в коротком диффузоре с большим углом расширения α средняя скорость резко снижается, и по отношению к ней пульсационная скорость становится больше, то есть возрастает турбулентность потока.

Модель турбулентности в двумерном случае на этом участке можно представить в виде:

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} = v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} \right) - \hat{p} \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + u_x \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + u_y \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + u_z \frac{\partial \hat{p}}{\partial z}. \quad (15)$$

Для установившегося движения Тогда

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0.$$

$$\frac{\partial \hat{p}}{\partial t} = v_{\text{eff}} \left(\frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial z^2} \right) + u_x \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} + u_y \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} + u_z \frac{\partial \hat{p}}{\partial z}. \quad (17)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial K}{\partial t} + u_x \frac{\partial K}{\partial x} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + S_K, \\ \frac{\partial K}{\partial t} + u_y \frac{\partial K}{\partial y} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} + S_K, \\ \frac{\partial K}{\partial t} + u_z \frac{\partial K}{\partial z} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 K}{\partial z^2} + S_K; \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} + u_x \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + S_E, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + u_y \frac{\partial E}{\partial y} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + S_E, \\ \frac{\partial E}{\partial t} + u_z \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{v_{\text{eff}}}{\sigma_K} \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + S_E, \end{cases} \quad (14)$$

где u_x, u_y, u_z – проекции скорости на координатные оси (рис. 1-а).

Деформация среды вблизи неподвижной твердой стенки диффузора определяется как:

$$D = \left| \frac{\partial u_\tau}{\partial n} \right|$$

Граничные условия на твердых поверхностях (у стенок корпуса) будут:

$$\left. \frac{\partial K}{\partial n} \right|_\Gamma = 0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial n} \right|_\Gamma = 0,$$

где n – нормаль к поверхности.

Давление с учетом слабой сжимаемости будет:

Кроме этого, в диффузорах с большим углом раскрытия α происходит неизбежный отрыв потока от стенки диффузора, что в свою очередь создает макровихри и еще больше деформирует профиль поля вектора скорости. Увеличение поперечного сечения по длине диффузора обуславливает уменьшение средней скорости течения и, согласно уравнению Бернулли, повышение статического давления. Таким образом, вдоль диффузора устанавливается положительный градиент давления, вызывающий силу, которая направлена против основного течения.

Статическое давление, повышающееся вдоль диффузора, одинаково по всему поперечному сечению, включая область, непосредственно прилегающую к стенке, тогда как скорости распределены по сечению неравномерно и у стенки снижаются до нуля.

Вследствие того, что по длине диффузора скорость течения продолжает уменьшаться, при определенных значениях угла α и числа Рейнольдса Re возникает состояние, при котором запас кинетической энергии потока в пограничном слое становится недостаточным для преодоления давления, характеризующегося положительным градиентом, и поток отрывается от стенок [4], создавая дополнительные макровихри.

В диффузорах с углом α от 28 до 80° наблюдается режим течения с полностью развитым отрывом потока, а при углах более 80° течение переходит в струйный режим. Местоположение начала отрыва обуславливается не только углом α и числом Re , но и характером распределения поля вектора скорости в начальном сечении. При вогнутом профиле поля вектора скорости точка отрыва смещена ближе к выходу диффузора, при выпуклом профиле — приближается к началу диффузора.

На выходе диффузора располагается сужающийся участок 8 (рис.1), формирующий плоскую струю при выходе потока в объем нижней шахты. Сформированная таким образом затопленная струя распространяется в ограниченном стенками нижней шахты пространстве, взаимодействуя с вращающимся питающим валиком

9 и разрыхляющим барабаном 2, имеющим четыре планки с зубьями.

Начальная скорость и давление внутри струи имеют пульсации, обусловленные турбулентным течением в диффузоре. На них накладываются вихри, возникающие в пограничном слое струи при взаимодействии ее с окружающим воздухом, и возмущения, создаваемые игольчатыми планками вращающегося разрыхляющего барабана. Использование разрыхляющего барабана, обтянутого цельнометаллической игольчатой лентой, позволяет не только интенсифицировать процесс разрыхления волокна, но и снизить образование воздушных вихрей.

Двойное влияние на турбулентность оказывает волокнистая масса, вводимая в поток разрыхляющим барабаном. Игольчатые планки при вращении барабана поочередно ударяют по волокнистой бороде, подаваемой питающим валиком, вводя волокно в нижнюю шахту порциями, внося дополнительные пульсации. Волокнистый клочок, попадая в турбулентный поток, механически соединяет участки, в которых скорости пульсации направлены случайным образом, передавая и усредняя количества движения между двумя (или более) областями в поле турбулентного течения. За счет этого повышается турбулентная вязкость волокнисто-воздушной смеси.

В то же время включение в поток дополнительной массы гасит турбулентность, то есть снижает скорость пульсаций.

Эффективная вязкость для волокнисто-воздушной смеси может быть определена по формуле:

$$v_{\text{eff}} = v_a^{\text{mol}} + (1 - \mu)v_a^{\text{turb}} + \mu v_b^{\text{turb}}, \quad (18)$$

где μ — доля волокна по массе в общем потоке волокнисто-воздушной смеси; v_a^{mol} — молекулярная вязкость чистого воздуха; v_a^{turb} — турбулентная вязкость с учетом гашения волокнами турбулентных пульсаций; v_b^{turb} — турбулентная вязкость с учетом вклада волокон в обмен количеством

движения между различными областями потока (на расстояниях, сравнимых с длиной волокна):

$$v_a^{\text{turb}} = \ell^2 G e^{-\alpha y} = k^2 L^2 G e^{-\alpha y}, \quad (19)$$

$$v_b^{\text{turb}} = k_1^2 \ell_b^2 G, \quad (20)$$

Здесь ℓ – длина пути перемешивания в чистом воздухе (чем меньше клочок волокна, тем она больше); ℓ_b – средняя длина волокон; L – кратчайшее расстояние от расчетной точки до ближайшей неподвижной твердой стенки; k – постоянная Т.Кармана – величина, оценивающая скорость деформации среды в данной точке; α и k_1 – постоянные величины.

$$G = \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right| \equiv \left| \frac{u_{\max}}{L} \right|, \quad (21)$$

где y – нормаль к твердой поверхности; u_{\max} – наибольшая средняя скорость в потоке.

В двумерном случае G можно определить как:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2}. \quad (22)$$

На основании изложенного отмечаем, что для снижения степени турбулентности необходимо модернизировать узел пневмостабилизации (рис. 3).

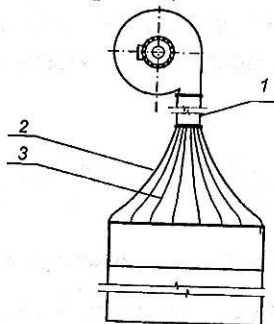


Рис. 3

Для этого между вентилятором и диффузором необходимо установить промежуточный прямолинейный канал 1 длиной не менее пяти его приведенных диаметров для стабилизации макровихрей и выравни-

вания профиля скоростей выходящего из вентилятора потока.

Диффузор должен быть с плавно закругленными боковыми стенками 2 и с продольными перегородками 3, разделяющими его на параллельные каналы со значительно меньшими углами раскрытия, что исключает условия для отрыва потока от боковых стенок и снижает степень его турбулизации.

Кроме этого, применение разрыхляющего барабана, равномерно обтянутого пыльчатой garniturой, позволяет снизить возмущения, вносимые им в поток при вращении, и уменьшить среднюю массу клочка хлопка, что также уменьшит степень турбулизации потока.

Эксперименты, проведенные в производственных условиях, показали, что образование макровихрей в свободном объеме нижней шахты заметно снижается при увеличении расхода удаляемого воздуха через систему аспирации 10 (рис.1), что благотворно влияет на качество чесальной ленты.

ВЫВОДЫ

Рассмотрены причины образования турбулентности уплотняющего воздушного потока в нижней шахте двухкамерного бункерного питателя и определены пути ее уменьшения за счет изменения технологических параметров и изменения конструкции узла пневматической стабилизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башков А.П. Исследование работы двухкамерного бункерного питателя для чесальных машин // Межвуз. сб. научн. тр.: Совершенствование техники и технологии прядильного производства. – Иваново: ИвТИ, 1991. С. 19...28.
2. Черкасский В.М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергия, 1977.
3. Балаев Э.Ф., Ясинский Ф.Н. Компьютерное моделирование текстильных технологических процессов в аэродинамических полях / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2002.
4. Идельчик И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1983.

Рекомендована кафедрой механической технологии волокнистых материалов. Поступила 11.05.05.