

УДК 677.021

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ  
КОЭФФИЦИЕНТА АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ  
ДЛЯ НАТУРАЛЬНОГО ВОЛОКНА**

*Р.В. КОРАБЕЛЬНИКОВ, Д.А. ЛЕБЕДЕВ, Е.И. ГРОМОВА*

(Костромской государственной технологической университет)

Поведение волокнистых частиц в технологических процессах при транспортировке и очистке во многом определяется воздействием на них сил как со стороны рабочих органов, так и сил аэродинамической природы.

В силу этого знание реальных значений сил аэродинамического сопротивления частиц волокна позволит правильно решать задачи, связанные с транспортированием волокна, а также с вопросами выбора параметров очистителей при решении задач движения этих частиц и взаимодействия их с рабочими органами пыльно-колосниковых систем [1...7].

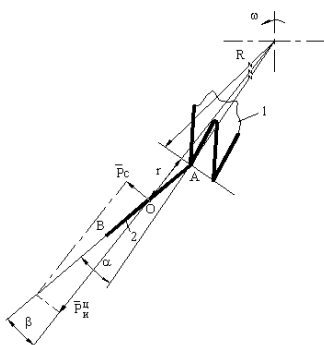


Рис. 1

В процессе очистки волокна в пыльных очистителях прядки волокна захватываются пыльными рабочими органами и перемещаются по колосниковой решетке. Характер поведения прядки при ее вращении с пыльным цилиндром показан на рис. 1,

где 1 – пыльный цилиндр; 2 – прядь волокна.

Если считать, что прядка закреплена на зубе пилы жестко, то на нее будут действовать следующие силы:

- 1) сила сопротивления воздуха  $P_c$ ;
- 2) центробежная сила инерции  $P_{ц}$ ;
- 3) сила тяжести  $G$ .

Для удобства анализа были приняты следующие допущения:

- распределенные силы заменили равнодействующими  $P_{ц}$ ,  $G$ ,  $P_c$ , сосредоточенными в центре тяжести прядки волокна;
- прядку волокна представили в виде цилиндра с размерами  $l$ ,  $d$ ;
- в дальнейшем пренебрегли силой тяжести прядки (которая, по сравнению с другими силами, мала).

Набегающий воздушный поток формирует силу сопротивления воздуха, стремящуюся отклонить прядку волокна (здесь и далее понимаем – свободную часть прядки волокна) от радиального направления [5]. Она определяется так:

$$P_c = CS \frac{\rho V_B^2}{2}, \quad (1)$$

где  $C$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $S$  – миделево сечение прядки волокна;  $\rho$  – плотность воздуха;

$V_B$  – скорость воздушного потока.

Центробежная сила инерции, действующая на прядки волокна, будет:

$$P_{и}^{ц} = \frac{mV^2}{(R+r)} = m\omega^2 (R+r), \quad (2)$$

где  $m$  – масса прядки волокна;  $V$  – линейная скорость движения центра тяжести  $O$  прядки волокна;  $\omega$  – угловая скорость пильного цилиндра;  $R$  – радиус пильного цилиндра;  $r$  – радиальная координата центра тяжести  $O$  прядки волокна.

Величина отклонения прядки от радиального положения будет характеризовать величину силы аэродинамического сопротивления. Величина этого отклонения характеризуется углом  $\alpha$ .

Из уравнения моментов сил относительно точки  $A$  для случая равновесного состояния прядки волокна ( $\alpha \cong \beta = \text{const}$ ) угол отклонения определится следующим образом:

$$\alpha = \text{arctg} \frac{P_c}{P_{и}^{ц}} = \text{arctg} \frac{CS\rho V_B^2}{2m\omega^2 (R+r)}. \quad (3)$$

Для скорости воздуха относительно волокна принимаем:

$$V_B = kV = k\omega(R+r), \quad (4)$$

где  $k$  – постоянная, показывающая степень вовлечения воздуха во вращательное движение пильным цилиндром ( $0 \leq k \leq 1$ ).

Тогда из (3) получим:

$$\alpha = \text{arctg} \frac{(R+r)CS\rho k^2}{2m}. \quad (5)$$

Поскольку  $R \gg r$ , то можно записать

$$\alpha = \text{arctg} \frac{RCS\rho k^2}{2m}. \quad (6)$$

Последнее соотношение показывает, что угол отклонения волокна  $\alpha$  напрямую не зависит от угловой скорости вращения  $\omega$  пильного цилиндра. Однако данная зависимость может проявляться через изменение величины коэффициента аэродинамического сопротивления, частично зависящего от формы прядки.

В общем случае коэффициент  $C$  является функцией следующих аргументов:  $C=f(\text{Re}, \text{форма}, \text{степень турбулентности}, \text{шероховатость})$ . Наиболее существенными аргументами являются число Рейнольдса и форма тела. Кроме того, волокнистые материалы обладают значительной проницаемостью при воздействии на них воздушного потока.

В процессах первичной переработки волокна и в дальнейших процессах трепания и чесания волокна находятся в разрыхленном состоянии и отдельные волокнистые комки оказывают потоку иное сопротивление, чем монолитные тела такой же формы и плотности, то есть особенностью текстильных материалов является их высокая воздухопроницаемость, поэтому вопросы внешнего обтекания тел (внешняя задача) одновременно сочетаются с вопросами фильтрации потока внутри тела (внутренняя задача), что меняет его аэродинамическое сопротивление [5], [6].

В этой связи точное аналитическое определение величины коэффициента аэродинамического сопротивления представляется затруднительным. Имеющиеся же решения внутренней (закон Дарси) и внешней (уравнение Навье-Стокса) задач справедливы только для весьма малых чисел Рейнольдса [5], [6].

Нами предполагается через определение угла отклонения прядки волокна исследовать закономерность изменения коэффициента аэродинамического сопротивления, аэродинамической силы и ее соотношения с центробежной силой инерции в функции вида сырья, скорости набегающего воздушного потока, площади поперечного сечения и объемной плотности пряди волокна.

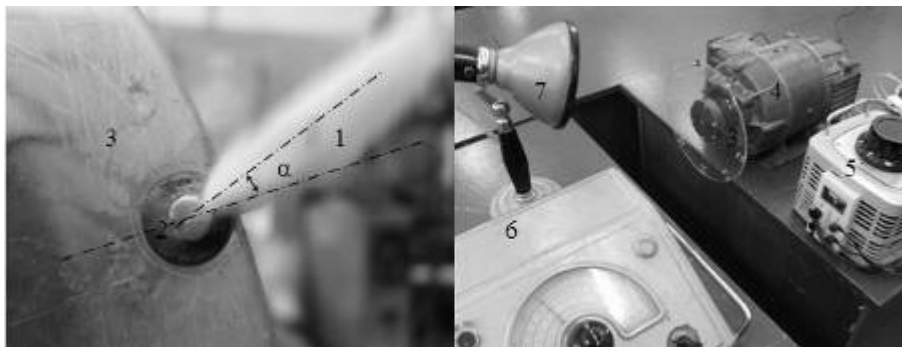


Рис. 2

Поставленная задача решалась экспериментально. Для визуального наблюдения быстротекущего процесса был использован стробоскопический метод (рис. 2 – экспериментальный стенд для определения угла отклонения пряди волокна от радиального направления: 1 – прядь волокна; 2 – зажим; 3 – вращающийся диск; 4 – электродвигатель; 5 – лабораторный автотрансформатор; 6 – стробоскопический тахометр; 7 – импульсная лампа). При этом прядка волокна полагается равномерной по плотности, волокна удовлетворительно параллелизованы; содержание сорных примесей в волокне, его влажность и другие свойства не принимаются во внимание.

Кроме того, поскольку под действием центробежных сил отдельные волокна распрямляются и прядка вытягивается в продольном направлении, ее можно представить в виде удлиненного тела, близкого к цилиндрической форме, размер поперечного сечения которого весьма мал по сравнению с его длиной.

Следует отметить, что при проведении эксперимента для исключения действия момента сопротивления изгибу прядки волокна крепилась на диске с помощью специального зажима, позволяющего ей свободно вращаться относительно точки крепления.

Исследование проводилось с использованием математических методов планирования и анализа результатов эксперимента. В полном факторном эксперименте исследовалось влияние количественных факторов: скорости движения прядки волокна  $X_1$  ( $V = \omega R$ ) и миделева сечения прядки волокна  $X_2$  ( $S = d\ell$ , где  $d$  и  $\ell$  – соответственно поперечный размер и длина прядки волокна) на изменение угла отклонения прядки волокна  $Y(\alpha)$  для различных по виду и объемной плотности  $\left(\gamma = \frac{4m}{\pi\ell d^2}\right)$  волокнистых материалов.

Интервалы варьирования факторов, а также значения их нижних и верхних уровней приведены в табл. 1.

Таблица 1

Варьируемые факторы	Интервалы варьирования	Значения факторов	
		нижний уровень (-)	верхний уровень (+)
Скорость движения прядки $X_1, \frac{M}{c}$	8,0	17,0	33,0
Миделево сечение $X_2, m^2$	$75 \cdot 10^{-6}$	$150 \cdot 10^{-6}$	$300 \cdot 10^{-6}$

При проведении эксперимента использовалось короткоштапельное льняное волокно, полученное из нормальной вылежки льняной тресты сорта "Белочка" (№ 1,75), и хлопковое волокно, полученное

из хлопка-сырца II сорта, разновидности 4880-С.

Образцы прядей формировались вручную: из хлопчатобумажной ленты нарезались фрагменты длиной 30 и 60 мм, после

чего формировались хлопковые пряжи различной массы с постоянным поперечным сечением 5 мм; аналогичным образом из льняной тресты были сформированы образцы льняных прядей. Причем длина образца, сформированного из хлопчатобумажной ленты, превышала длину волокон.

Это делалось специально – для сравнения отклонений с образцом из льна.

Матрица планирования и результаты эксперимента приведены в табл. 2. Число повторных опытов в каждой строке матрицы равнялось пяти.

Т а б л и ц а 2

№ опыта	Уровни факторов		Угол отклонения пряжи волокна $\gamma$ , град			
	$X_1$	$X_2$	хлопковое волокно		короткоштапельное льняное волокно	
			$\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$	$\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$	$\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$	$\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$
1	–	–	43,2	33,1	37,1	25,8
2	+	–	42,0	32,2	35,0	25,5
3	–	+	59,4	42,6	51,2	35,3
4	+	+	44,0	40,5	37,0	34,4

После обработки результатов эксперимента для разных видов натуральных волокон и различной плотности получены уравнения регрессии, адекватно описывающие исследуемый процесс:

1) для хлопкового волокна:

– при объемной плотности  $\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$

$$Y = 47,15 - 4,15X_1 + 4,55X_2 - 3,55X_1X_2; \quad (7)$$

– при объемной плотности  $\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$

$$Y = 37,1 - 0,75X_1 + 4,55X_2 - 0,3X_1X_2; \quad (8)$$

2) для короткоштапельного льняного волокна:

– при объемной плотности  $\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$

$$Y = 40,075 - 4,075X_1 + 4,025X_2 - 3,025X_1X_2; \quad (9)$$

– при объемной плотности  $\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$

$$Y = 30,25 - 0,3X_1 + 4,6X_2 - 0,15X_1X_2; \quad (10)$$

Величины коэффициентов при  $X_1$  и  $X_2$  указывают на значимость исследуемых факторов в рассмотренных пределах. Наибольшее влияние на угол отклонения пря-

ди волокна оказывает фактор  $X_2$ , в меньшей степени – фактор  $X_1$ .

Коэффициент аэродинамического сопротивления находили из формулы (6) с учетом измеренного угла отклонения пряжи волокна, что позволяет согласовать результаты расчета с результатами эксперимента:

$$C = \frac{2mtg\alpha}{Rd\rho k^2 \cos\alpha}. \quad (11)$$

Для величин, входящих в выражение (11), были приняты следующие значения:

$R=0,15$  м;  $\rho = 1,25 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$  и  $k=1$  (означает, что

воздух не захватывается пыльным цилиндром и, следовательно, его скорость относительно волокна является максимальной).

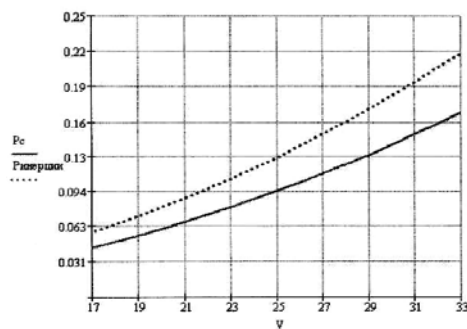
По известной величине коэффициента аэродинамического сопротивления из (1) определяли силу аэродинамического сопротивления  $P_c$ . Результаты расчетов и

соотношение сил  $P_c$  и  $P_{и}^{ц}$  представлены в виде графиков на рис. 3-а, б, в, г – изменение силы сопротивления  $P_c$  и центробежной силы инерции  $P_{и}^{ц}$  от скорости  $V$ :

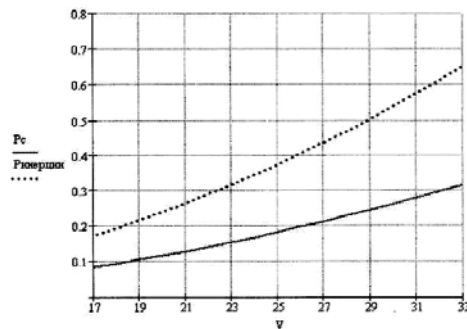
а) короткоштапельное льняное волокно при  $\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ ; б) короткоштапельное

льняное волокно при  $\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ ; в) хлопковое  
волокно при  $\gamma = 51 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ ; г) хлопковое

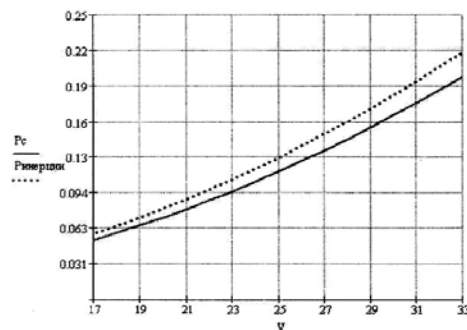
волокно при  $\gamma = 77 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$ .



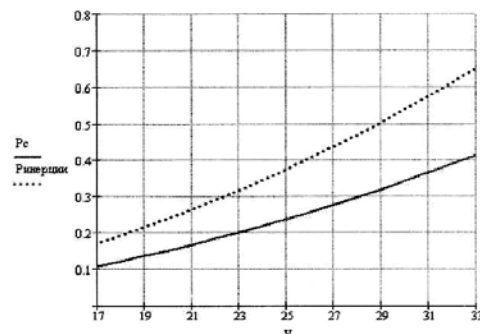
а)



б)



в)



г)

Рис. 3

Из анализа полученных данных можно заключить, что с увеличением угловой скорости пыльного цилиндра уменьшается угол отклонения прядки волокна, а следовательно, и коэффициент аэродинамического сопротивления.

По нашему мнению, это можно объяснить следующим. При увеличении скорости воздушного потока прядь волокна начинает деформироваться (нарушается ее первоначальная форма), отдельные кончики волокон, выступающие из пряди, отклоняются по направлению потока, меняя тем самым характер шероховатости поверхности пряди, что определяет и изменение ее сопротивления. При этом уменьшается отношение силы аэродинамического сопротивления к центробежной силе инерции  $\frac{P_c}{P_{ц}}$  и угол отклонения  $\alpha$ , что ве-

дет к улучшению условий взаимодействия волокна с колосниками.

Сила аэродинамического сопротивления составляет в среднем 60% от величины центробежной силы инерции, что в значительной мере отличается от результатов, представленных в [3].

Уменьшение коэффициента аэродинамического сопротивления наблюдается и при увеличении объемной плотности пряди волокна. На первый взгляд, данное явление противоречит общепринятому пониманию процесса. Так, в [5] говорится о том, что воздушный поток, движущийся через поры пронизаемого волокнистого материала, уменьшает разность давлений в лобовой и концевой частях тела и в итоге снижает сопротивление волокнистого тела потоку по сравнению с монолитным телом.

На наш взгляд, такое несоответствие можно объяснить следующим. В выбран-

ном для эксперимента интервале варьирования объемной плотности пористость материала при заданных размерах и структуре пряжи волокна меняется незначительно, поэтому изменение величины фильтрации также минимально. В то же время при большей объемной плотности пряжи волокна ввиду увеличения однородности и уменьшения шероховатости ее поверхности внешнее обтекание потоком воздуха происходит в более благоприятных условиях.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана методика определения сил аэродинамического сопротивления, действующих на волокно, довольно точно моделирующая реальный процесс и позволяющая исследовать воздействие воздушных потоков на больших скоростях. Данная методика может быть использована для изучения аэродинамических характеристик не только волокна, но и летучек хлопка-сырца, сорных примесей и др.

2. Определены значения коэффициента аэродинамического сопротивления для короткоштапельного льняного и хлопкового волокон.

3. Установлены зависимости изменения коэффициента аэродинамического сопротивления силы и ее соотношения с цен-

тробежной силой инерции от вида сырья, скорости набегающего воздушного потока, площади поперечного сечения и объемной плотности пряжи волокна.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Суслов Н.Н.* Исследование воздушных потоков в зоне трепания льняных машин двустороннего действия // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1958, № 3.

2. *Кузнецов Г.К., Савиновский В.И., Суслов Н.Н.* Аэродинамическая сила, действующая на слой волокна в процессе трепания // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1986, № 2.

3. *Разин С.Н., Пашин Е.Л.* Теоретические основы совершенствования механической модификации льна: Монография. – Кострома: КГТУ, 2005.

4. *Корабельников Р.В., Корабельников А.Р.* Теория и практика совершенствования очистителей волокна: Монография. – Кострома: КГТУ, 2001.

5. *Павлов Г.Г.* Аэродинамика технологических процессов и оборудования текстильной промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1975.

6. *Потапов Е.Д., Соколова Ю.А.* Аэродинамика пористых материалов. – М.: Изд-во Полеотип, 2005.

7. *Корабельников Р.В., Лебедев Д.А.* Определение сил аэродинамического сопротивления в процессе очистки натуральных волокон // Научн. тр. молод. ученых КГТУ. – Кострома: КГТУ, 2007, №8.

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин и проектирования текстильных машин. Поступила 03.12.07.