

ТЕПЛООБМЕН ПУЧКА НИТЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ШАХТЕ

Панкеев А.М.; Корниенко С.П.; Чередниченко П.И.

Опыт эксплуатации оборудования для формования синтетических нитей показал, что процесс охлаждения оказывает существенное влияние на производительность формовочного оборудования и качественные показатели получаемых нитей.

Существующие устройства для охлаждения нити с поперечным обдувом формируемого пучка не обеспечивают получения нитей необходимого качества. Неравномерное температурное поле в охлаждающем устройстве приводит к различным условиям теплообмена отдельных элементарных нитей, входящих в пучок. Это приводит к ухудшению процесса замасливания и не позволяет улучшить равномерность физико-механических показателей нитей в пучке и снижает общую прочность комплексной нити.

Для прогнозирования влияния разных факторов на процесс формования и выбора оптимальных режимов охлаждения нитей необходимо разработать математические модели удобные для инженерных расчетов процесса охлаждения пучка нитей.

Рассмотрим движение и теплообмен пучка нитей в обдувочной шахте (рис.1). Она представляет собой цилиндрический стакан, в верхней части которого осуществляется распределенная подача охладителя. Принимая, что течение ламинарное, охлаждающий воздух несжимаемый, его теплофизические характеристики постоянны, поперечные скорости в пучке малы по сравнению с продольными скоростями, получим упрощенную систему уравнений фильтрационного движения и теплообмена в пучке:

$$\begin{aligned}
 \rho \varepsilon^{-1} \left(U_1 \frac{\partial U_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial U_1}{\partial r} \right) &= -\varepsilon \frac{dP}{dx} - f_p + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_{\text{зф}} \frac{\partial U_1}{\partial r}); \\
 \frac{\partial (r U_1)}{\partial x} + \frac{\partial (r V_1)}{\partial r} &= 0; \\
 \rho C_p \varepsilon^{-1} \left(U_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + V_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) &= -\varepsilon^{-1} q_p + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_{\text{зф}} \frac{\partial T_1}{\partial r})
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ - плотность воздуха;

ε - пористость пучка;

U_1, V_1, T_1 - фильтрационные скорости и температура воздуха в пучке;

f_p, q_p - объемное трение и тепловой поток в пучке;

$\mu_{\text{зф}}, \lambda_{\text{зф}}$ - коэффициент динамической вязкости и коэффициент теплопроводности охлаждающего воздуха;

C_p - теплоемкость охлаждающего воздуха.

С внешней стороны к пучку нитей примыкает область движения сопутствующего потока обдуваемого воздуха. Уравнение для неё можно получить из (1), приняв $\varepsilon=1$, $f_p=q_p=0$, а условия стыкования течения и тепломассообмена в пучке и соответствующем потоке:

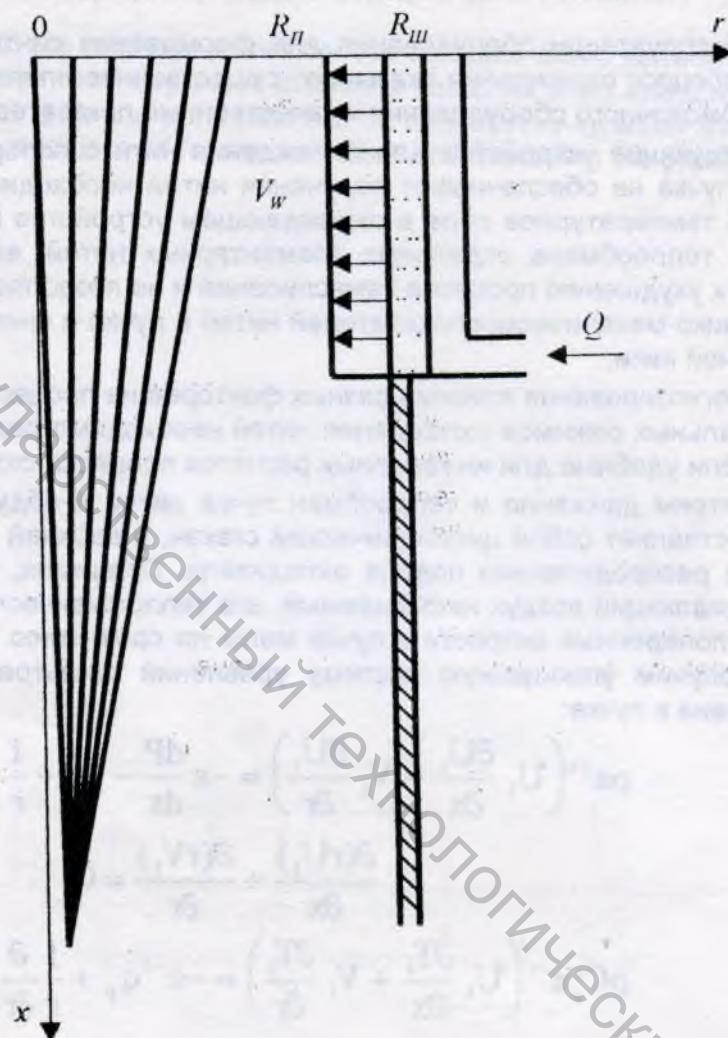


Рис.1. Схема охлаждения пучка нитей в обдувочной шахте

К статье Панкеева А.М., Корниенко С.П., Чередниченко П.И. "Теплообмен пучка нитей в цилиндрической шахте".

$$\mu \frac{\partial U_2}{\partial r} = \mu_{,\phi} \frac{\partial U_1}{\partial r}; \lambda = \frac{\partial T_2}{\partial r} = \varepsilon \lambda_{,\phi} \frac{\partial T_1}{\partial r};$$

$$U_2(x, R_n) = \varepsilon^{-1} U_1(x, R_n); \quad (2)$$

$$V_2(x, R_n) = V_1(x, R_n);$$

$$T_2(x, R_n) = T_1(x, R_n);$$

где U_2 ; T_2 - скорость и температура сопутствующего потока воздуха;
 R_n - радиус пучка нитей.

На границе пограничного слоя граничные условия имеют вид:

$$\frac{\partial U_1}{\partial r} = 0; V_1 = 0; \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, (r = 0); \quad (3)$$

$$U_2(x, R_w) = 0; T_2(x, R_w) = T_w,$$

где R_w - радиус обдувочной шахты;

T_w - температура охлаждающего воздуха у стенки шахты.

Подача охлаждающего воздуха в шахту и величина его расхода учитывается следующими граничными условиями:

$$V = V_w(x), \text{при } r = R_w, 0 \leq x \leq L_0; \quad (4)$$

$$V = 0, \text{при } r = R_w, L_0 \leq x \leq L_1,$$

где V_w - скорость подачи охлаждающего воздуха;

L_0 - длина зоны, где подается охлаждающий воздух.

Для вычисления градиента давления dP/dx будем использовать интегральное условие изменения расхода воздуха в шахте:

$$Q(x) = 2\pi \rho \left(\int_0^{R_w} U_1 r dr + \int_{R_n}^{R_w} U_2 r dr \right) = 2\pi \rho R_w \int_0^x V_w dx. \quad (5)$$

Неизвестные величины f_p и q_p , характеризующие гидродинамическое и тепловое взаимодействие нитей с воздухом, можно определить при помощи методик [1,2,3]:

$$f_p = \frac{2\mu(U_1 - \varepsilon U_B)}{R_\Delta^2 (1-a) \ln R_\Delta / R_B} + \left(1 - \varepsilon - \varepsilon \frac{a}{2(1-a)} \right) \frac{dP}{dx}; \quad (6)$$

$$q_p = \frac{2\lambda}{R_\Delta^2 \ln R_\Delta / R_B} \cdot \frac{U_1 (T_1 - T_B)}{U_B (1-a) + (U_1 - \varepsilon U_B) C_o + a_p (C_1 - \varepsilon^2 C_o / 2)},$$

где R_B ; U_B ; T_B - радиус, скорость движения и температура нити;

R_Δ - радиус эффективной ячейки:

$$R_\Delta = R_n / \sqrt{N};$$

N - количество элементарных нитей в пучке;

a ; a_p ; C_o ; C_1 - константы, зависящие от геометрических характеристик пучка.

Для вычисления T_B можно воспользоваться уравнением теплопроводности для движущейся мононити:

$$\rho_B C_{pB} U_B \frac{dT_B}{dx} = \frac{2q_B}{R_B} \quad (7)$$

где ρ_B ; C_{pB} - плотность и теплоемкость нити;

$$q_B - тепловой поток на поверхности нити, q_B = \frac{R_B^2 q}{2R_B}.$$

С помощью уравнения (7) устанавливается связь между температурой нити T_B и температурой воздуха в ячейке T_1 , которая, в свою очередь, определяется условиями охлаждения всего пучка.

Полученная система уравнений (1-7) содержит один неопределенный параметр - распределение радиусов нити по длине и толщине пучка $R_B=R_B(x, r)$.

Вычисление R_B должно проводиться совместно с расчетом фильтрационных параметров пучка. Принимая, что радиус нити не зависит от его положения в пучке $R_B=R(x)$ и учитывая, что начальный и конечный радиус нити фиксированы, радиус нити определяем по зависимости:

$$R_B(x) = R_{Bh} + (R_{Bh} - R_{Bk}) \exp(-\varphi x), \quad (8)$$

где R_{Bh} - начальный радиус нити;

R_{Bk} - конечный радиус нити;

φ - параметр, отражающий темп изменения радиуса по длине.

В такой постановке проведен численный расчет теплообмена комплексной кордной поликапроамидной нити в цилиндрической шахте. Исходные данные:

радиус шахты -

$$R_{sh} = 0,125 \text{ м};$$

радиус пучка -

$$R_p = 0,095 \text{ м};$$

начальный радиус нити -

$$R_{Bh} = 0,00015 \text{ м};$$

количество элементарных нитей в комплексной -

$$N = 280;$$

длина зоны охлаждения -

$$L = 4,0 \text{ м};$$

скорость формования -

$$V_f = 7,83 \text{ м/с};$$

подача расплава на фильтру -

$$G = 24 \text{ кг/час};$$

температура расплава -

$$T_0 = 285 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

температура охлаждающего воздуха -

$$T_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

расход охлаждающего воздуха -

$$Q = 300 \text{ м}^3/\text{час};$$

температура среды у стенки шахты -

$$T_w = 20 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

параметры полимера -

$$\rho_p = 1070 \text{ кг/м}^3;$$

$$\lambda_{pB} = 0,31 \text{ Вт/м}^{\circ}\text{K};$$

$$C_{pB} = 2100 \text{ Дж/кг}^{\circ}\text{K}.$$

Распределение радиуса нити по длине, полученное при заданном расходе полимера и скорости формования представлено на рис. 2. Распределение температур элементарных нитей в центре и на её поверхности представлены на рис. 3. Здесь же приведено распределение температур нитей при охлаждении пучка в открытой среде.

Полученные результаты показывают, что охлаждение в устройствах закрытого типа происходит значительно интенсивней, чем в открытом пространстве. Это обусловлено тем, что расход обдувочного воздуха на охлаждение значительно больше расхода естественно эжектируемого движущимся пучком. Кроме того, перепад температур по толщине комплексной нити при закрытом способе формования существенно меньше.

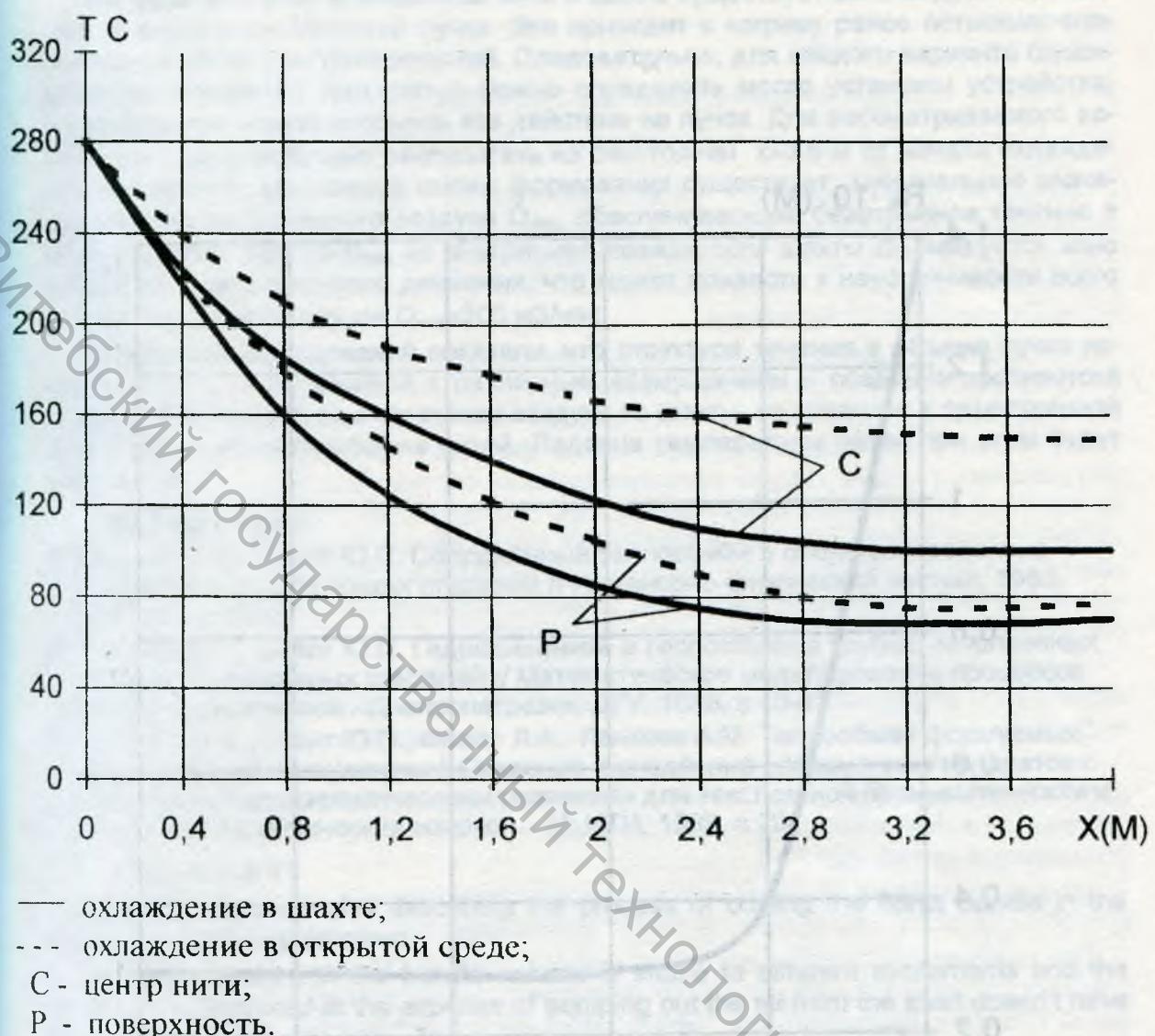


Рис.2. Распределение радиусов элементарных нитей по длине формуемого пучка

К статье Нанкеева А.М., Корниенко С.П., Чередниченко П.И. "Теплообмен пучка нитей в цилиндрической шахте".

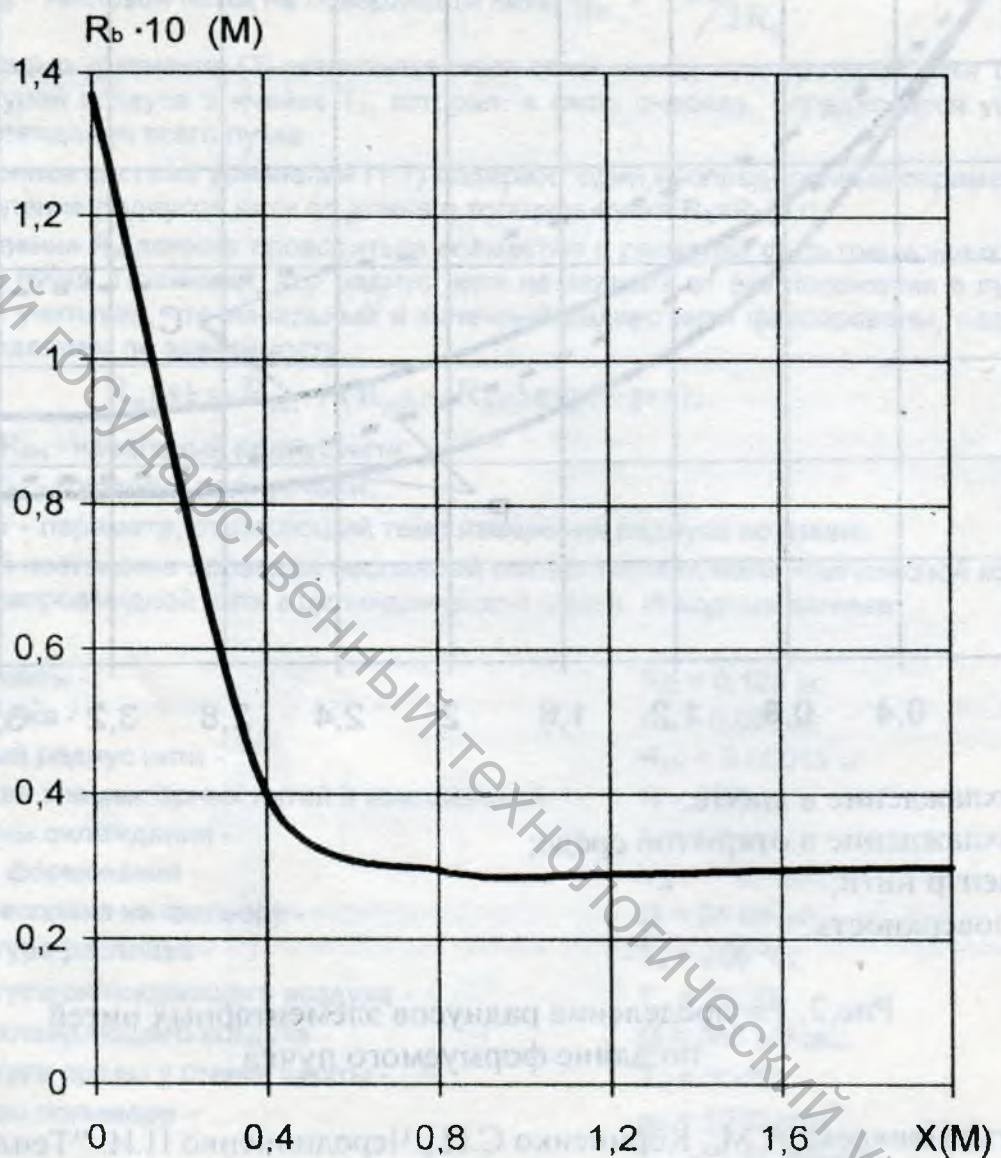


Рис.3. Распределение температур нитей в центре и на поверхности при охлаждении пучка и при движении в открытой среде.

При формировании комплексной нити в шахте существует зона выдува горячего газа из внутренних областей пучка. Это приводит к нагреву ранее остывших элементарных нитей у их поверхностей. Следовательно, для каждого варианта охлаждения по поведению температур можно определить место установки устройства, организующего дополнительное воздействие на пучок. Для рассматриваемого варианта его целесообразно располагать на расстоянии $x \approx 3,6$ м от начала охлаждения. Кроме того, для каждой схемы формования существует минимальное значение расхода охлажденного воздуха Q_{min} , обеспечивающее безотрывное течение в объеме шахты. При $Q < Q_{min}$ на внутренней поверхности шахты формируется зона возвратно-циркуляционного движения, что может привести к неустойчивости всего потока. Для данного случая $Q_{min} \approx 200$ м³/час.

Проведение исследований показали, что структура течения в объеме пучка является довольно устойчивой к различным возмущениям и создание противотока обдувочного воздуха, за счет отсоса воздуха из шахты, не приводит к существенной интенсификации теплообмена нитей. Падение температуры нитей при этом будет небольшим.

Л и т е р а т у р а

1. Елисеев В.И., Совет Ю.П. Сопряженный теплообмен в открытых продольно движущихся пучках тонких стержней // Инженерно-физический журнал, 1988, т.56, №6, с.1033.
2. Елисеев В.П., Совет Ю.П. Гидродинамика и теплообмен в трубах, заполненных пучками неподвижных стержней // Математическое моделирование процессов тепломассопереноса - Днепропетровск, ДГУ, 1988, с.40-41.
3. Елисеев В.П., Совет Ю.П., Флеер Л.А., Панкеев А.М. Теплообмен формуемых нитей в обдувочных шахтах // Создание и внедрение современных аппаратов с активными гидродинамическими режимами для текстильной промышленности и производства химических волокон. - М: НТИ, 1989, с.29

SUMMARY:

Analytical dependencies describing the process of cooling the fibres bundle in the cylindrical shaft were obtained.

The flow structure in the bundle volume is stable to different excitements and the reverse flow produced at the expense of pumping out the air from the shaft doesn't have any influence.