

УДК 536.24

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОВАНИЯ ПУЧКОВ ВОЛОКОН ИЗ РАСПЛАВОВ ПОЛИМЕРА

В. И. Елисеев, Ю. П. Совит, Л. А. Флеер

Днепропетровский государственный университет, 320625 Днепропетровск

Сформулирована математическая модель процесса формирования синтетических нитей, движущихся пучком. Рассмотрено три основных варианта: формирование открытых пучков, формирование в обдувочных шахтах и вытяжка нитей с помощью эжектора. В рамках максвелловской модели вязкоупругой жидкости рассмотрены также режимы низко- и высокоскоростного формирования. На основе проведенных расчетов показано влияние способов формирования на параметры получаемых нитей в пучке и отмечена значительная зависимость их от локальных условий при высокоскоростной вытяжке, сопровождаемой ориентационной кристаллизацией.

Введение. Вопросы теории формирования одиночных волокон в настоящее время широко освещены в литературе. Впервые основные уравнения движения волокон в рамках модели ньютоновской жидкости и уравнения теплообмена между волокнами и средой сформулированы в работах [1, 2]. Более общие уравнения для нелинейно-вязких жидкостей выведены в [3, 4]. При изучении высокоскоростного формирования нашли свое место и модели вязкоупругих жидкостей [5]. На основе полученных уравнений в [1, 2, 6–9] проведено численное моделирование процесса вытяжки одиночных нитей для различных схем формирования, в результате чего выявлены основные закономерности процесса.

Главной особенностью формирования пучков нитей является гидродинамическое и тепловое взаимодействие элементарных волокон в пучке. Процесс формирования каждого филламента зависит от местоположения волокна в пучке и условий взаимодействия пучка с внешней средой. Как показывают расчеты и эксперименты [10, 11], в процессе формирования внутри пучка возникает термически и гидродинамически стабилизированная область течения, находящаяся в квазиравновесном с окружающими нитями состоянии и обладающая значительной консервативностью к внешним условиям (воздействиям). Вследствие этого в конце зоны формирования наблюдается существенное различие в параметрах отдельных волокон. В данной работе построена математическая модель процесса формирования пучка нитей и численно определены его основные закономерности и параметры свежесформованных нитей.

1. Постановка задачи. Задача о формировании пучка волокон состоит из двух групп уравнений: уравнений движения и теплообмена между пучком и внешней средой и уравнений движения и теплообмена между самими элементарными волокнами с некоторыми определяющими параметрами, характеризующими процесс.

К первой группе относятся уравнения конвективного теплообмена [11, 12], которые имеют вид

$$\varepsilon^{-1} \left(u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) = -\varepsilon \frac{dp}{\rho dx} + R_U + \nu \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right), \quad \frac{\partial(r u_1)}{\partial x} + \frac{\partial(r v_1)}{\partial r} = 0; \quad (1.1)$$

$$\varepsilon^{-1} \rho c \left(u_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) = -\varepsilon^{-1} R_T + \lambda \frac{\partial}{r \partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad (1.2)$$

где (x, r) — цилиндрическая система координат; u_1, v_1 — компоненты вектора скорости газа в пучке в направлении осей x, r ; T_1 — температура газа; ρ — плотность; p — давление; ε — порозность пучка ($\varepsilon = 1 - (r_n/r_\Delta)^2$); ν — кинематический коэффициент вязкости; c — коэффициент теплоемкости; λ — коэффициент теплопроводности; параметры R_U и R_T характеризуют силовое и тепловое взаимодействие между газом и волокном:

$$R_U = (D/S)\tau_n, \quad R_T = (D/S)q_n,$$

где $D = 2\pi r_n$, $S = \pi r_\Delta^2$, r_n — радиус нити, $r_\Delta = R_p N^{-1/2}$ — радиус ячейки, R_p — радиус пучка, N — количество нитей, τ_n и q_n — трение и тепловой поток на поверхности нити. Аналитические выражения для τ_n и q_n получены на основе модели ячеек и метода последовательных приближений. Для градиентного течения выражения для τ_n и q_n в первом приближении имеют вид

$$\tau_n = \frac{\mu(\varepsilon U_n - u_1)}{r_n(1-B) \ln(r_\Delta/r_n)} - \left[1 - \varepsilon - \frac{\varepsilon B}{2(1-B)} \right] \frac{r_\Delta^2}{2r_n} \frac{dp}{dx},$$

$$q_n = \frac{\lambda}{r_n \ln(r_\Delta/r_n)} \frac{u_1(T_n - T_1)}{U_n(1-B) + (u_1 - \varepsilon U_n)c_0 + B_p(c_1 - \varepsilon^2 c_0/2)}, \quad (1.3)$$

$$c_0 = \frac{\ln(r_\Delta/r_n) - 1 + B}{(1-B) \ln(r_\Delta/r_n)}, \quad c_1 = \frac{B-1}{2} + \varepsilon - \frac{3}{4} \varepsilon B, \quad B = \frac{\varepsilon}{2 \ln(r_\Delta/r_n)}, \quad B_p = \frac{r_\Delta^2}{4\mu} \frac{dp}{dx}.$$

Нестабилизованность течения в ячейке учитывается поправками второго приближения. Выражения для τ_n и q_n во втором приближении из-за громоздкости не приводятся. Уравнения (1.1), (1.2) описывают движение газа и теплообмен в пучке волокон, а при $\varepsilon = 1$ и $\bar{R}_U = R_T = 0$ и во внешней области. В дальнейшем индекс 2 относится к параметрам течения внешней среды. Взаимодействие потоков в пучке и внешней области учитывается с помощью равенств скоростей, температур, напряжений трения и тепловых потоков на границе пучка (при $r = R_p$), которые в рамках модели пограничного слоя имеют вид [11, 13]

$$u_2 = \varepsilon^{-1} u_1, \quad v_2 = v_1, \quad T_2 = T_1, \quad \mu \frac{\partial u_2}{\partial r} = \mu \frac{\partial u_1}{\partial r}, \quad \lambda \frac{\partial T_2}{\partial r} = \varepsilon \lambda \frac{\partial T_1}{\partial r}. \quad (1.4)$$

К выражениям (1.4) необходимо добавить условия симметрии на оси пучка и для открытого пучка условия для внешнего течения на бесконечности либо условия на стенке канала. Уравнения второй группы, сформулированные в [14] на основе математической модели, разработанной в [15], могут быть выписаны в виде

$$Q \frac{dU_n}{dx} = \frac{d}{dx} (A\sigma_n) - 2\pi r_n \tau_n; \quad (1.5)$$

$$\sigma_n = \beta \frac{dU_n}{dx} - \beta \frac{U_n}{G} \frac{d\sigma_n}{dx}; \quad (1.6)$$

$$Q c_n \frac{dT_n}{dx} = 2\pi r_n q_n + QH \frac{d\Theta}{dx} + A\beta \left(\frac{dU_n}{dx} \right)^2 + 2\pi r_n q_r; \quad (1.7)$$

$$U_n \frac{d\Theta}{dx} = K_T K_\Delta (\Theta_* - \Theta), \quad (1.8)$$

где U_n, T_n — скорость и температура нити; c_n — коэффициент теплоемкости полимера; A — площадь поперечного сечения волокна; Q — расход полимера через фильеру; σ_n — напряжение; Θ — степень кристалличности; Θ_* — степень кристалличности в равновесном состоянии; H — скрытое тепло кристаллизации; G — модуль сдвига; $q_r = \varepsilon_n \sigma (T_n^4 - T_\infty^4)$;

σ — постоянная Больцмана; ε_n — степень черноты поверхности нити; T_∞ — температура среды на бесконечности; K_T и K_Δ — коэффициенты. Так как пучок волокон является довольно разреженным пористым телом, при вычислении радиационных потоков с поверхностей нитей пренебрежем их взаимным влиянием.

Уравнение (1.5) является уравнением движения одиночной тонкой нити, (1.6) — уравнением реологического состояния жидкости [15], (1.7) — уравнением теплообмена, (1.8) — феноменологическим уравнением процесса кристаллизации, и оно соответствует уравнению Аврами с показателем степени, равным единице. Выбор такого значения показателя степени основывается на теоретических и экспериментальных исследованиях ориентационной кристаллизации [15–17]. Коэффициент K_T зависит только от температуры и определяет скорость кристаллизации в процессах без вытяжки, коэффициент K_Δ зависит от параметра двойного лучепреломления (ДЛП) Δn — от меры вытяжки волокна и молекулярной ориентации полимера. Согласно [15] ДЛП при небольших величинах внутреннего напряжения σ_n зависит от него линейно:

$$\Delta n = m\sigma_n. \quad (1.9)$$

Система уравнений (1.1)–(1.9) является замкнутой и полностью определяет процесс вытягивания нитей из расплавов полимера с учетом ориентационной кристаллизации. Система уравнений движения и теплообмена нити (1.5)–(1.9) описывает достаточно полно физические процессы, которые происходят в волокне, в частности кристаллизацию полимера в период вытяжки волокна из фильеры. Она играет существенную роль в формировании физических свойств волокон.

В зависимости от интенсивности кристаллизации процесс формования нити условно делится на низко- и высокоскоростной. Для высокоскоростного формования характерно получение волокна с высокими степенями ориентации молекул и кристалличности. Особую роль при высокоскоростном формовании играет возникновение локальной деформации (шейки). Условия образования шейки и ее развитие привлекали внимание исследователей, этому явлению посвящено немало работ, например [6, 15]. В частности, в [15] приведены различные физические модели и сформулированы уравнения на базе кинетических и феноменологических представлений. Одна из этих моделей, являющаяся, на наш взгляд, наиболее полной, представлена в данной работе. Она может использоваться для качественного исследования высокоскоростного формования нитей из полиэтилентерефталата (ПЭТФ).

Как показывают экспериментальные исследования [16–18], при низких скоростях формования ПЭТФ обладает невысокой скоростью кристаллизации с образованием сложных морфологических форм — кристаллитов [19]. При высоких скоростях формования ($U_n \sim 90 \div 100$ м/с) возникают другие структуры [20, 21], приводящие к упрочнению волокна, при этом степень кристалличности становится порядка 0,4 и выше. В таких условиях формование может сопровождаться появлением шейки в области с низкой температурой волокна. Для этого, как показывают результаты работы [15] и наши расчеты формования одиночной нити, необходимы довольно интенсивное охлаждение и высокое напряжение.

При формовании пучков волокон без применения дополнительных средств охлаждения (установления обдувочных устройств) в результате теплового экранирования возникают другие, нежели для одиночной нити, локальные условия, которые в значительной степени могут влиять на ориентацию молекулярных цепей в полимере. Данная модель призвана определить основные закономерности низкоскоростного формования и выявить возможности математического моделирования процесса получения волокон с высокой степенью ориентации и кристалличности.

2. Результаты расчетов. Численное моделирование процесса формования проведено для трех основных схем формования: в открытом пространстве без применения обдувочных устройств, в обдувочной шахте и формование с эжекторной вытяжкой. Рас-

четы проведенны при следующих значениях определяющих параметров: плотность полимера $\rho_n = 1356 - 0,5 T_n$ кг/м³; $c_n = 1260 + 2,52 T_n$ Дж/(кг · К); $H = 121$ Дж/кг; $G = 10^8$ Па; $\Theta_* = 0,4$; $\epsilon_n = 1$; начальный радиус пучка $R_p = 0,05$ м; длина зоны формования $L = 2$ м; продольная вязкость для ПЭТФ определялась из соотношения [15] $\beta = 0,725 \exp [5260,0/(T_n + 273)](1 + 99 \Theta)$.

Пучок в открытом пространстве. При формировании пучка волокон в открытом пространстве внешнюю среду можно считать неподвижной, вследствие чего граничные условия для уравнений движения и теплообмена (1.1), (1.2) на бесконечности будут иметь вид $u_2(\infty) = 0$, $T_2(\infty) = T_\infty$ (температура T_∞ в расчетах принималась равной 20 °С).

Задача формования теперь замыкается граничными условиями для волокон, которые для приемного устройства типа ролика, вращающегося с постоянной скоростью, имеют вид

$$U_n(0) = U_{n0}, \quad T_n(0) = T_{n0}, \quad r_n(0) = r_{n0}, \quad U_n(L) = U_L, \quad (2.1)$$

где параметры с индексом 0 определяются условиями на фильере, а U_L — скорость формования, которая зависит от приемного устройства.

Для уравнения (1.5) ставится краевое условие в конце зоны формования. Это существенно усложняет решение уравнений (1.1)–(1.9), поскольку для напряжения, температуры и степени кристалличности волокна сформулированы задачи Коши, а уравнения (1.1), (1.2) являются уравнениями параболического типа. Для решения краевой задачи (1.5), (2.1) строится итерационная последовательность решений задач Коши. В качестве итерационного параметра принимаем реологическую силу, приложенную к волокну в сечении фильеры $x = 0$. Итерационный процесс решения состоит в следующем: задается начальное значение реологической силы F_{r0} (реологическая сила $F_r = A\sigma_n$, $F_{r0} = F_r(0)$); для этого значения F_{r0} решается задача формования пучка волокон (1.1)–(1.9); вычисляются значения скоростей волокон в конце зоны формования $(u_L)_i$. Если $|(u_L)_i/U_L - 1| > \alpha$ (i — номер итерации, α — задаваемая погрешность вычислений), корректируется значение F_{r0} и процесс повторяется. Если $|(u_L)_i/U_L - 1| < \alpha$, итерационный процесс заканчивается. Как показывают расчеты, количество итераций существенно зависит как от метода корректировки значения реологической силы F_{r0} , так и от особенностей процесса формования. Так, при большом различии параметров внешних и внутренних волокон, например при формировании в открытой среде, количество итераций, необходимое для достижения заданной точности, значительно возрастает. В среднем количество итерационных циклов при расчете формования открытого пучка равно примерно 50–60 и при формировании в шахте — 10–20.

На рис. 1 представлены кривые изменения скорости U_n , температуры T_n и степени кристалличности Θ нитей, находящихся на оси s (сплошные линии), на расстоянии половины радиуса w (штриховые) и на поверхности p пучка (штрихпунктирные). В расчетах принято $U_{n0} = 0,5$ м/с; $T_{n0} = 295$ °С; $r_{n0} = 0,000125; 0,00015$ м (рис. 1, а и б соответственно). Количество нитей в пучке $N = 100$, а значение коэффициента m взято равным $2,5 \cdot 10^{-9}$. Видно, что при таких параметрах волокна в пучке имеют различную температуру, вследствие чего скорость вытяжки периферийных нитей с более низкой температурой растет быстрее, чем скорость внутренних волокон. Это указывает на то, что сила тяги, прикладываемая приемным устройством к внешним волокнам, оказывается выше, в результате чего эти волокна находятся в более напряженном состоянии. Однако кристаллизация протекает только в волокнах, находящихся в непосредственной близости к оси пучка. Кривые скоростей и температур нитей в центральной части пучка качественно мало различаются, на них хорошо заметны всплески температуры в конце зоны формования. Это связано с тем, что степень кристалличности Θ таких волокон быстро достигает равновесного значения $\Theta_* = 0,4$. Температура нитей, находящихся на поверхности пучка, также претерпевает

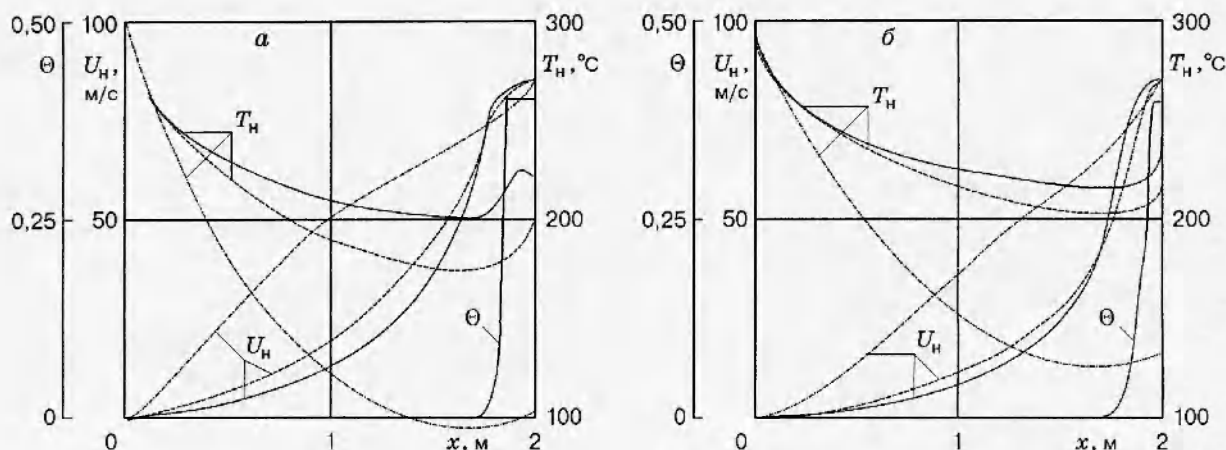


Рис. 1

заметный, но довольно плавный подъем в конце зоны. Такое изменение температуры объясняется не процессом кристаллизации в этих волокнах, а тем, что в сходящемся пучке внешние нити по мере своего движения попадают в область с высокой температурой газа, который находится в квазиравновесном состоянии с центральными волокнами. Подъем температуры в нитях, движущихся на расстоянии половины радиуса пучка, хорошо наблюдается в конце рассматриваемой области. Он обусловлен как уменьшением радиуса пучка, так и началом ориентационной кристаллизации, которая в масштабах рисунка еще не достигла заметной величины.

Пучок в обдувочной шахте. Формование в шахте сопровождается подачей охлаждающего воздуха, который вместе с пучком нитей движется вдоль канала с радиусом R_K . На стенке шахты примем $u_2(R_K) = 0$, $T_2(R_K) = T_w$, $v_2(R_K) = 0$, причем температуру на стенке канала T_w положим равной 20°C . К граничным условиям (2.1) необходимо добавить величину расхода газа в шахте. В нашем случае (для упрощенной схемы течения) примем, что скорость воздуха в начальном сечении постоянна и равна 4 м/с , начальные условия такие же, что и в предыдущем случае, количество нитей $N = 100$.

На рис. 2, а приведены кривые скоростей и температур для нитей на оси пучка для трех вариантов счета: 1 — $r_{H0} = 0,000125\text{ м}$, $U_L = 70\text{ м/с}$; 2 — $r_{H0} = 0,00015\text{ м}$, $U_L = 70\text{ м/с}$;

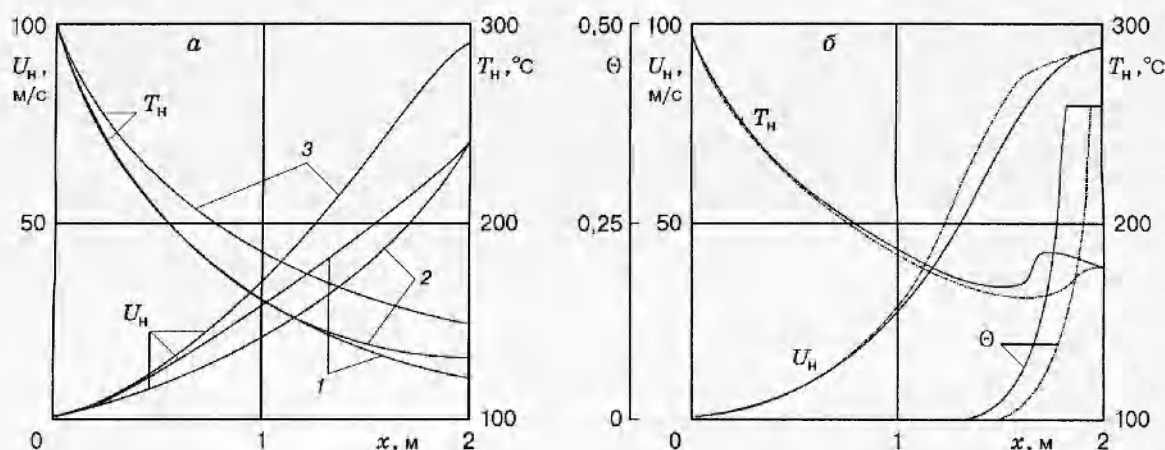


Рис. 2

3 — $r_{н0} = 0,000125$ м, $U_L = 95$ м/с. Разброс в температурах волокон в пучке небольшой, поэтому скорости нитей, находящихся в объеме пучка и на его поверхности, в масштабе рисунка мало отличаются от скоростей нитей на оси пучка. Из расчета следует, что охлаждение нитей в шахте происходит значительно интенсивнее, поле температур однороднее, чем в предыдущем случае. Видно, что в обдувочных шахтах волокна получают более однородными по своим параметрам, что подтверждается и практикой.

Линии 1 и 2 на рис. 2,а относятся к результатам численного моделирования низкоскоростного формования. Температура волокон здесь плавно убывает, при этом для более толстой нити кривая температуры 2 расположена несколько выше кривой 1. Кривая для скорости более толстых нитей проходит под кривой 1, относящейся к охлаждаемым с большей скоростью тонким нитям. Кривым 3 соответствует уже довольно высокая скорость вытяжки нити. Однако температура нитей здесь быстро убывает и волокна не успевают кристаллизироваться на данном интервале движения.

Другая картина наблюдается при формировании более толстых нитей. На рис. 2,б (обозначения кривых здесь и далее аналогичны принятым на рис. 1) показаны кривые изменения скорости, температуры и степени кристалличности для случая с $r_{н0} = 0,00015$, $U_L = 95$ м/с. Так как температура волокон в этом случае уменьшается медленнее, волокна попадают в условия, которые способствуют быстрой кристаллизации полимера. Хорошо видны крутые всплески температуры в конце зоны формования и резкие подъемы степени кристалличности. Важной особенностью рассматриваемого процесса по сравнению с процессом для интенсивно охлаждаемой одиночной нити [15] является то, что как в открытых пучках, так и в пучках, движущихся в шахте, кристаллизация проходит при более высоких температурах и в соответствии с экспериментальными результатами осуществляется при сравнительно небольших значениях ДЛП Δn (при низкотемпературном растяжении одиночной нити в наших расчетах величина ДЛП достигала значений порядка $0,08 \div 0,1$, в рассмотренных же случаях $\Delta n \sim 0,03 \div 0,04$). Необходимо отметить, что, несмотря на небольшую разницу в температурах и скоростях для центральных и периферийных волокон до момента кристаллизации, сам процесс ориентационной кристаллизации начинается на разных расстояниях от фильеры и приводит к расслоению кривых. Это указывает на высокую чувствительность ориентационной кристаллизации к условиям формования.

Аэродинамическое формование. В отличие от двух предыдущих схем, в которых задается скорость вытяжки нити, в данном случае формование осуществляется с помощью эжектора. Технологическим, физическим и математическим аспектам задачи посвящен ряд работ, например [9, 22–24], в которых рассмотрены особенности аэродинамического формования, сформулирована математическая постановка задачи, установлены основные закономерности. Из анализа задачи следует, что в качестве граничного условия для волокна в конце зоны формования должно выполняться равенство $F_r = F_T$, где $F_r = F_i + F_f + F_{r0}$ — реологическая сила, действующая на струю непосредственно перед эжектором; F_{r0} — реологическая сила в сечении фильеры; F_i — инерционная сила; F_f — сила трения нити в среде; F_T — сила трения нити в эжекторе. Пренебрегая непосредственным взаимодействием нитей друг с другом и со стенкой при случайных контактах, выражение для F_T можно записать в виде [15] $F_T = 2\pi r_n l \rho c_f (U_T - U_n)^2$, $c_f = 0,5 \text{Re}^{-0,61}$, $\text{Re} = 2r_n (U_T - U_n) / \nu$ (l — длина эжектора). При этом также принимается, что в соответствии с [9] из-за быстрого охлаждения радиус нити в эжекторе меняется очень слабо, вследствие чего его можно считать постоянной величиной.

На рис. 3 представлено распределение скоростей и температур нитей в открытых пучках, формируемых с помощью эжектора длиной $l = 20$ см, в котором скорость газа $U_T = 200$ м/с; расчеты проводились при $N = 100$ для $r_{н0} = 0,000125$ м (а) и $r_{н0} = 0,00015$ м (б). Из рисунков следует, что температура внутренних волокон плавно падает по мере дви-

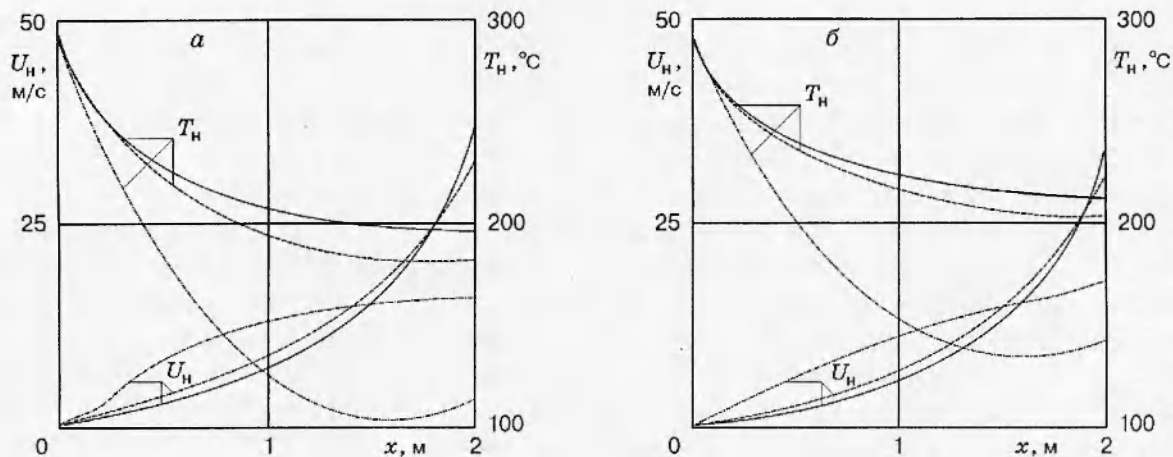


Рис. 3

жения нитей и достигает локального уровня, квазиравновесного со средой. Характерной особенностью этой задачи, как и задачи для открытого пучка, является существенное отличие температуры поверхностных нитей от температуры внутренних. Значительное падение температуры внешних волокон по сравнению с центральными приводит к тому, что их скорость у эжекторного устройства примерно в два раза ниже скорости горячих нитей. Наблюдаемый на рис. 3 небольшой перегиб кривых скоростей для внешних волокон связан с повышением их температуры за счет входа в область горячего газа.

В заключение необходимо отметить следующее. Построенная математическая модель позволяет рассчитывать процессы формирования пучков волокон при различных условиях. С помощью полученных решений выявлены качественные закономерности движения и распределения температуры нитей при формировании. Расчет процесса формирования при низких скоростях не вызывает больших математических затруднений. Для численного решения уравнений (1.1)–(1.9) используется метод, разработанный в [25] на основе конечно-разностной схемы Кранка — Николсона. Сходимость решений при соответствующем выборе начальных условий указывает на устойчивость принятого итерационного процесса. Зависимость конечных параметров волокон от параметров математической модели может быть значительна, но хорошо контролируема в процессе решения.

При высокоскоростном формировании, когда идет перестройка молекулярной структуры, сопровождающаяся высокими динамическими и температурными напряжениями, приводящими к резким всплескам температуры и локальным удлинением, вычислительные сложности увеличиваются. В этом случае использование экстраполяционного метода, предложенного в [26], для интегрирования одномерных уравнений (1.5)–(1.9) существенно упрощает получение решений. Однако важно также обратить внимание на то, что модель ориентационной кристаллизации [15], по мнению ее авторов, носит качественный характер и нуждается в дальнейших исследованиях. Наши расчеты формирования как одиночных нитей, так и пучков указывают на то, что процесс ориентационной кристаллизации чрезвычайно чувствителен к внешним условиям (см. рис. 2, б), а также к некоторым параметрам математической модели. В соответствии с этим для получения результатов, претендующих на количественное совпадение с реальными величинами, модель должна быть отработана на экспериментальном материале с тщательным соблюдением условий эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kase S., Matsuo T. Studies on melt spinning. 1. Fundamental equations on the dynamics of melt spinning // J. Polimer Sci. A. 1965. V. 3, N 7. P. 2541–2551.
2. Matsuo T., Yasuda H., Sugiyama H. Phenomenal theories for melt spinning process and their applications // Тр. II Междунар. симп. по хим. волокнам. Калинин, 1977. Т. 2. С. 206–222.
3. Ентов В. М., Ярин А. Л. Динамика струй капельной жидкости. М., 1979 (Препр. / АН СССР. Ин-т пробл. механики; № 127).
4. Ентов В. М., Ярин А. Л. Динамика свободных струй и пленок вязких и реологически сложных жидкостей. М.: ВИНТИ, 1984 (Итоги науки и техники. Сер. МЖГ; Т. 18).
5. Чанг Дей Хан. Реология в процессах переработки полимеров. М.: Химия, 1979.
6. Зябицкий А. Теоретические основы формирования химических волокон. М.: Химия, 1979.
7. Жиганов Н. К., Янков В. И., Краснов В. П. Реакция нитей, формируемых из расплавов полимеров, на импульсные и ступенчатые возмущения // Журн. прикл. химии. 1988. Т. 61, № 3. С. 559–565.
8. Жиганов Н. К., Янков В. И., Геллер В. Э. Моделирование процессов высокоскоростного формирования вязкоупругих расплавов полимеров с учетом полного баланса сил // Хим. волокна. 1990. № 6. С. 21–23.
9. Елисеев В. И., Флеер Л. А. Сопряженная задача аэродинамического вытягивания струй нагретой вязкой жидкости // ПМТФ. 1988. № 6. С. 148–153.
10. Жиганов Н. К., Некрасов Ю. П., Янков В. И. и др. Неравномерность охлаждения пучка элементарных нитей в шахтах с боковым обдувом // Хим. волокна. 1988. № 3. С. 19–21.
11. Елисеев В. И., Совит Ю. П. Гидродинамика и теплообмен в трубе с пучком движущихся стержней // Весці АН Беларусі. Сер. фіз.-энерг. наук. 1992. № 1. С. 76–83.
12. Елисеев В. И., Совит Ю. П. Свободно-конвективный теплообмен в открытых системах вертикальных стержней // ПМТФ. 1990. № 5. С. 88–95.
13. Somerton C. W., Catton J. On the thermal instability of superposed porous and fluid layers // Trans. ASME: J. Heat Transfer. 1982. V. 104, N 1. P. 160–166.
14. Елисеев В. И., Совит Ю. П., Флеер Л. А. Численное моделирование теплообмена при кристаллизации пучка движущихся волокон // Инж.-физ. журн. 1994. Т. 67, № 3/4. С. 313–318.
15. Высокоскоростное формирование волокон / Под ред. А. Зябицкого и Х. Каваи. М.: Химия, 1988.
16. Перепелкин К. Е. Физико-химические основы процессов формирования химических волокон. М.: Химия, 1978.
17. Гаспарян Х. А., Баранов В. Г., Мартынов М. А. и др. Влияние деформации на кинетику кристаллизации статистически сшитых полимеров // Высокомолекуляр. соединения. 1992. Т. (А) 34, № 1. С. 51–61.
18. Папков С. П. Фазовые переходы в процессах переработки полимерных систем // Высокомолекуляр. соединения. 1989. Т. (А) 31, № 4. С. 675–683.
19. Дьячик И., Дюрчова О., Миттерпахова М. и др. Морфология полиэтилентерефталатных волокон, получаемых различными способами // Высокомолекуляр. соединения. 1990. Т. (А) 32, № 2. С. 393–398.
20. Геллер В. Э., Грибанов С. А. Структурообразование при высокоскоростном формировании полиэтилентерефталата // Хим. волокна. 1988. № 3. С. 16–19.
21. Ямбрих М., Мурарова А., Хвала А. и др. Изменение структуры и свойств полиэфирных нитей в процессе высокоскоростного формирования // Хим. волокна. 1990. № 2. С. 57, 58.

22. Генис А. В., Фильберт Д. В., Синдеев А. А. Баланс сил при аэродинамическом формировании нитей из расплава полипропилена // Хим. волокна. 1978. № 3. С. 27–29.
23. Жиганов Н. К., Янков В. И., Алексеев Е. Н. и др. Математическая модель аэродинамического способа формирования волокон из расплава полимера // Хим. волокна. 1988. № 5. С. 18–20.
24. Жиганов Н. К., Янков В. И., Алексеев Е. Н. и др. Влияние параметров аэродинамического формирования и свойств полимера на диаметр волокон // Там же. С. 37–39.
25. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов В. А. Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса. М.: Наука, 1984.
26. Хайрер Э., Нерсетт С., Ваннер Г. Решение обыкновенных дифференциальных уравнений. Нежесткие задачи. М.: Мир, 1990.

*Поступила в редакцию 26/VII 1996 г.,
в окончательном варианте — 28/III 1997 г.*
