

УДК 532.135

**СТРУКТУРНЫЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ
ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВЯЗКОУПРУГИХ МАТЕРИАЛОВ**

Н.А. Беляева

Представлены математические модели процессов течения и деформирования материалов с эволюционирующей структурой. Задачи охватывают широкий круг структурночувствительных объектов - от порошковых систем до полимерных материалов и композитов на их основе. Указанные модели позволяют определять изменение деформационных, тепловых и структурных характеристик многообразных систем в ходе различных процессов - отверждение, течение неньютоновской жидкости, твердофазная экструзия.

Введение

В представленных математических моделях сформулирован и развит единый подход к проблемам структурной механики, целью которого является описание закономерностей формирования строения и реологических свойств структурночувствительных материалов в реальных физических условиях. Структурные изменения рассматриваемых материалов (полимеры, композиты на их основе) в процессе их переработки влияют на деформационные, тепловые характеристики, оказываются ответственными за различные явления самоорганизации. В процессах деформирования полимерных (композитных) систем совершаются глубокие изменения структуры, которые уже не сводятся только к изменению конформации макромолекул. Происходит более или менее интенсивное разрушение структуры, выраженное в уменьшении или увеличении числа узлов – контактов между макромолекулами, образующих пространственную сетку, сдерживающую развитие деформаций. Возможность формирования изделий из указанных материалов зависит как от уровня реологических свойств, так и от влияния на них условий деформирования, структурных и тепло-массообменных процессов. Особенностью и

новизной предлагаемого структурного подхода является взаимосвязанное рассмотрение реодинамики вязкоупругих систем с процессом структурных превращений. Именно такой подход позволяет провести анализ процессов деформирования вышеуказанных систем и дать объяснение характеру различных критических (пороговых) явлений и колебательным режимам. Результатом исследования условий формуемости материалов должен быть поиск оптимальных значений технологических параметров, обеспечивающих стабильную воспроизводимость технологического процесса и исключающих разного рода неустойчивость при получении изделий.

Вязкоупругие модели отверждения

Рассмотрим обзорно модели объемного и фронтального отверждений осесимметричных изделий (на примере цилиндра). Подробное описание указанных моделей, обсуждение результатов численных экспериментов представлено в работах [1]-[7].

Пусть формирование (отверждение) полого цилиндрического изделия ($R_1 \leq r \leq R$) происходит в ходе фазового перехода жидкость \rightarrow твердое тело при совместном протекании реакций полимеризации и кристаллизации. В рамках несвязанной теории термовязкоупругости распределение температуры $T = T(r, t)$; степени структурных превращений – глубины полимеризации $\alpha = \alpha(r, t)$ и кристаллизации $\eta = \eta(r, t)$ – определяется на основе макрокинетической модели совмещенного процесса:

$$\begin{aligned} c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda_0 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q_p \frac{\partial \alpha}{\partial t} + Q_k \frac{\partial \eta}{\partial t}, \\ \frac{\partial \alpha}{\partial t} &= k_{01} \exp \left(-\frac{U}{R_u T} \right) (1 - \alpha)(\epsilon_1 + \alpha), \\ \frac{\partial \eta}{\partial t} &= k_{02} \exp \left(-\frac{E^a}{R_u T} - \frac{\psi T_p}{T(T_p - T)} \right) (\epsilon_2 + \eta)(\alpha \eta_p - \eta) \end{aligned} \quad (1)$$

с соответствующими начальными и граничными условиями. В системе (1) $c, \rho, \lambda_0, Q_p, Q_k, U, R_u, E^a, \psi, T_p, \epsilon_1, \epsilon_2$ – технологические параметры процесса.

В двумерном случае полные компоненты деформаций, радиальной и окружной, являются суммой вязкоупругой ϵ^* , температурной $\epsilon^T = \alpha_0(T - T_0)$ и химической $\epsilon^x = k_1\alpha + k_2\eta$ составляющих. Вязкоупругая компонента деформации ϵ^* ищется посредством интегрального

уравнения, записанного в тензорном виде

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{rr}^*(r, t) \\ \epsilon_{\varphi\varphi}^*(r, t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E & -\nu/E \\ -\nu/E & 1/E \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{rr}(r, t) \\ \sigma_{\varphi\varphi}(r, t) \end{pmatrix} + \int_0^t \begin{pmatrix} f_{rr}(t-\tau) & f_{r\varphi}(t-\tau) \\ f_{\varphi r}(t-\tau) & f_{\varphi\varphi}(t-\tau) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{rr}(r, \tau) \\ \sigma_{\varphi\varphi}(r, \tau) \end{pmatrix} d\tau. \quad (2)$$

где E, ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона, соответственно; неизвестные функции f_{ij} находятся с использованием стандартной модели вязкоупругого тела, определяющих соотношений (уравнения равновесия, условия совместности деформаций), применением к (2) преобразования Лапласа. Для определения компонент напряжений вводится [3, 6] вспомогательная функция напряжений $\Phi(r, t)$, так что

$$\sigma_{rr}(r, t) = \frac{\Phi(r, t)}{r}, \quad \sigma_{\varphi\varphi}(r, t) = \frac{\partial\Phi(r, t)}{\partial r}. \quad (3)$$

Функцию $\Phi(r, t)$, удается определить, используя преобразование Лапласа, в виде:

$$\Phi(r, t) = J(r, t) - \int_0^t (\lambda - \mu) \exp[-\lambda(t - \tau)] J(r, \tau) d\tau. \quad (4)$$

Здесь $\lambda = (E_1 + E_2)/\beta$, $\mu = E_2/\beta$; $E_1 = E = \text{const}$, E_2 — модуль упругости стандартной механической модели, зависящий от температуры, β — вязкость, являющаяся функцией температуры и степеней полимеризации и кристаллизации; значения функции $J(r, t)$ определяются решением макрокинетической модели (1).

Из соотношений (3), (6) получаем формулы для определения компонент напряжений:

$$\sigma_{rr}(r, t) = \frac{1}{r} \left[J(r, t) - \int_0^t (\lambda - \mu) \exp[-\lambda(t - \tau)] J(r, \tau) d\tau \right], \quad (5)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}(r, t) = \frac{\partial J(r, t)}{\partial r} - \int_0^t (\lambda - \mu) \exp[-\lambda(t - \tau)] \frac{\partial J(r, \tau)}{\partial r} d\tau. \quad (6)$$

По формулам (5), (6) находится динамика напряженного состояния формируемого изделия в зависимости от уровня температурного и конверсионного полей.

Фронтальный режим отверждения рассматривается [4]-[6] с точки зрения механики непрерывно наращиваемого твердого тела: элемент

растущего тела в окрестности какой-либо точки (r) деформируется совместно с другими элементами лишь начиная с момента его отверждения ($t^*(r)$), совпадающего с моментом присоединения этого элемента к образованной (затвердевшей) области $\Omega(t > t^*(r))$. Для учета динамического характера протекающего процесса – непрерывного наращивания – определяющие соотношения записываются в продифференцированном по времени виде. Следовательно, выражение для вязкоупругих компонент деформации (2), записанное покомпонентно, примет вид:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr}^*(r, t) = & \frac{1}{E} (\dot{\sigma}_{rr}(r, t) - \nu \dot{\sigma}_{\varphi\varphi}(r, t)) + f_{rr}(0) \sigma_{rr}(r, t) + f_{r\varphi}(0) \sigma_{\varphi\varphi}(r, t) + \\ & + \int_{t^*(r)}^t \dot{f}_{rr}(t - \tau) \sigma_{rr}(r, \tau) d\tau + \int_{t^*(r)}^t \dot{f}_{r\varphi}(t - \tau) \sigma_{\varphi\varphi}(r, \tau) d\tau, \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}^*(r, t) = & \frac{1}{E} (\dot{\sigma}_{\varphi\varphi}(r, t) - \nu \dot{\sigma}_{rr}(r, t)) + f_{\varphi r}(0) \sigma_{rr}(r, t) + f_{\varphi\varphi}(0) \sigma_{\varphi\varphi}(r, t) + \\ & + \int_{t^*(r)}^t \dot{f}_{\varphi r}(t - \tau) \sigma_{rr}(r, \tau) d\tau + \int_{t^*(r)}^t \dot{f}_{\varphi\varphi}(t - \tau) \sigma_{\varphi\varphi}(r, \tau) d\tau. \quad (8) \end{aligned}$$

Уравнение равновесия и условие совместности деформаций записываются

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{rr}}{\partial r} = \frac{\dot{\sigma}_{\varphi\varphi} - \dot{\sigma}_{rr}}{r}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}}{\partial r} = \frac{\dot{\epsilon}_{rr} - \dot{\epsilon}_{\varphi\varphi}}{r}. \quad (10)$$

Если на растущей поверхности задано внешнее давление $p(t)$, а на нерастущей поверхности $r = R_1$ – внутреннее давление $p_i(t)$, то соотношения (7)-(10) позволяют в явном виде определить производные компонент напряжения $\dot{\sigma}_{rr}$, $\dot{\sigma}_{\varphi\varphi}$.

Самоорганизация куэттовского течения структурированной жидкости

Обширный класс неньютоновских жидкостей образуют структурированные текучие системы (полимерные расплавы и растворы, концентрированные суспензии твердых частиц и другие). Структурные превращения в таких системах оказываются ответственными за процессы самоорганизации – спонтанное появление и развитие некоторой структуры в первоначально однородной среде.

Предположим, что жидкость является смесью двух компонент A_1 и A_2 , взаимно превращающихся друг в друга $A_1 \leftrightarrow A_2$ под действием приложенного механического поля, характеризуемого напряжением сдвига σ и скоростью деформации γ . В работах [8]-[11] рассмотрены случаи изотермических течений – куэтовское течение в плоском зазоре, напорное течение, сдвиговое течение между двумя коаксиальными цилиндрами, когда напряжение и скорость деформации являются скалярными величинами.

Пусть рассматриваемая жидкость подчиняется реологическому уравнению состояния

$$\sigma = \mu\gamma.$$

Здесь вязкость μ зависит от степени структурных превращений $a = a(\gamma)$ составляющих компонент жидкости:

$$\mu^{-1}(a) = \mu_1^{-1}a + \mu_2^{-1}(1 - a),$$

где μ_1, μ_2 – вязкости компонент A_1, A_2 , соответственно, a – доля A_1 в смеси A_1 и A_2 .

Суммарная скорость превращения структур, по аналогии с химическими реакциями первого порядка, определяется формулой:

$$\Phi = k_2(1 - a) - k_1a, \quad (11)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты скоростей разрушения и восстановления структуры.

Пространственное поведение реологических кривых рассмотренных течений свидетельствует о наличии областей сверханомалии вязкости – областей немонотонности реологических кривых. В случае куэтовского течения в плоском зазоре в указанной области происходит потеря устойчивости однородного стационарного состояния. Исследование [8, 9] неоднородного течения в области сверханомалии показало формирование диссипативной структуры, являющейся монотонно возрастающей или монотонно убывающей для псевдопластической жидкости.

Твердофазная плунжерная экструзия вязкоупругого структурированного материала

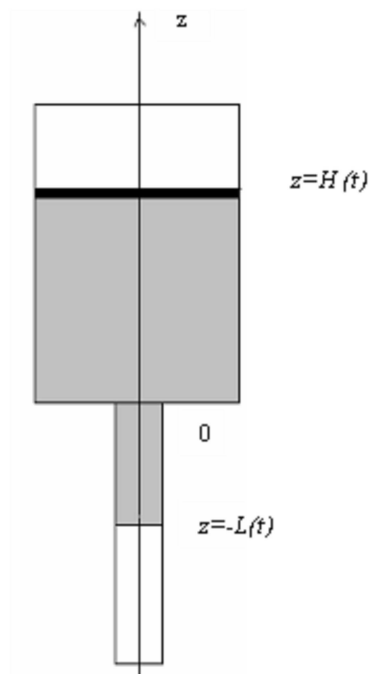


Рис. 1. Модель экструзии

Традиционные методы переработки органических и неорганических материалов в изделия используют длительные технологические операции внешнего нагрева для перевода их в вязкотекучее состояние с последующим охлаждением. Твердофазные технологии позволяют отказаться от внешнего нагрева, а это огромная экономия энергии и капитальных затрат. Твердофазная плунжерная экструзия полимерных (композитных) материалов – это одна из перспективных новых технологий XXI века. Однако, направление исследований, связанное с математическим моделированием процесса твердофазной плунжерной экструзии полимерных материалов еще мало разработано. Особенностью моделирования этого процесса является необходимость учета вязкоупругого течения материала, динамики структурообразования и технологических условий протекания процесса. Исследования автора данной статьи в указанном направлении ведутся совместно с научными сотрудниками ИСМАН РАН (г. Черноголовка) д.ф.-м.н. Столиным А.М. и д.т.н. Стельмах Л.С. Некоторые полученные результаты опубликованы в работах [12]-[15].

На первоначальном этапе создания теории плунжерной экструзии полимерных материалов рассматривается одномерная постановка задачи с учетом реального реологического поведения материалов и процесса структурных превращений. Таким образом, данная теория выходит за рамки чисто гидродинамического рассмотрения, что очень важно для современной реологии, в которой прямое рассмотрение процессов структурообразования является актуальной задачей.

Рассмотрим процесс выдавливания вязкоупругого сжимаемого материала из цилиндрической камеры в направляющий цилиндрический калибр под действием плунжера пресса (рис. 1). Для описания выбранного типа течения использованы лагранжевы координаты: (q, t_l) : t_l — реальное время, массовая координата q имеет смысл относительной массы материала, находящейся между переменным сечением z и свободной поверхностью $z = -L(t)$. Таким образом,

$$q = \frac{M}{S_0 \rho_1} = \int_0^z \rho(\xi, t) d\xi + \frac{S_1}{S_0} \int_{-L(t)}^0 \rho(\xi, t) d\xi,$$

где M — масса материала в указанном сечении, S_0, S_1 — площади сечений камеры и калибра, соответственно; ρ_1 — плотность несжимаемой основы материала, при этом плотность материала определяется произведением $\rho_1 \rho$, то есть ρ — относительная плотность среды.

Система определяющих соотношений течения в камере включает в себя уравнение неразрывности, дифференциальное уравнение состояния (на основе механической модели вязкоупругого тела Максвелла), уравнение равновесия, заменяющее уравнение движения в силу малости числа Рейнольдса (вязкость несжимаемой основы велика: $\mu_0 > 10^6$), диффузионно-кинетическое уравнение относительно степени структурирования a , начальные и граничные условия:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho^2 \frac{\partial V}{\partial q} = 0, \quad (12)$$

$$\partial \sigma / \partial q = 0 \quad (13)$$

$$\dot{\sigma} + \frac{G}{\mu} \sigma = G \frac{\partial V}{\partial q} \rho, \quad (14)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} + V \rho \frac{\partial a}{\partial q} = D \rho^2 \frac{\partial^2 a}{\partial q^2} + k_2 [1 - a - a \chi \exp(p\sigma)], \quad (15)$$

$$t = 0 : \rho(q, 0) = \rho_0(q), a = a_0(q); \quad (16)$$

$$V(q_+, t) = -\frac{S_1 k_r |\sigma(t)|^n}{S_0 \rho_1 \rho(q^*, t)}, V(q_-, t) = -\frac{k_r |\sigma(t)|^n}{\rho_1 \rho(q^*, t)}, \quad (17)$$

$$\frac{\partial a}{\partial q} \Big|_{q=q_0} = \frac{\partial a}{\partial q} \Big|_{q=q^*} = 0, \quad (18)$$

$$\sigma \Big|_{q=q_0} = \sigma(t) \quad (19)$$

или

$$V \Big|_{q=q_0} = V_0. \quad (20)$$

Из уравнения равновесия (13) следует, что напряжение в камере не зависит от массовой координаты, а является лишь функцией времени: $\sigma = \sigma(t)$.

В уравнении состояния (14) $\mu = \mu(a) = \mu_0 \exp(ka)$, $G = G(a) = \mu(a)/t_r$ — вязкость и модуль сдвига, соответственно, зависящие от степени структурных превращений a (концентрации межмолекулярных сшивок).

Процесс изменения структуры в ходе деформирования, описываемый диффузионно-кинетическим уравнением (15), будем трактовать как деформацию связей молекулярно-кинетических единиц под действием приложенного механического поля интенсивностью σ . Изменение числа межмолекулярных сшивок материала происходит в результате наложения двух процессов: разрушения и образования. Суммарную скорость превращения определяем по формуле (11), которую можно представить в виде

$$\Phi = -k_{10} \exp(p\sigma)a + k_2(1 - a),$$

где $\chi = k_{10}/k_2$.

Условия (16) определяют начальное распределение плотности и степени структуризации экструдированного материала. Первое из граничных условий (17), следуя закону гидравлического сопротивления, задает в камере скорость элементарной массы q^* , находящейся в момент времени t на отверстии, второе — в калибре. Граничные условия (18) означают отсутствие проникновения вещества через поршень и отсутствие изменения структуры в калибре. Условия (19), (20), определяют движение поршня: выдавливание происходит либо с заданным усилием (19), либо

с заданной скоростью (20). Оба рассматриваемых варианта позволяют получить полуаналитическое решение задачи экструзии на основе замкнутых систем уравнений (12)-(19) или (12)-(18), (20), то есть выразить искомые функции течения в камере через степень структуризации a . Для численного нахождения последней к уравнению (20) с начальными (16) и граничными (18) условиями применяется метод прогонки.

В калибре экструдированный материал движется свободно: трение о стенки калибра пренебрежимо мало, следовательно, отсутствует сопротивление движению материала. На свободной поверхности выполняется условие:

$$\sigma|_{q=0} = 0,$$

из которого следует, что в калибре напряжение $\sigma = 0$.

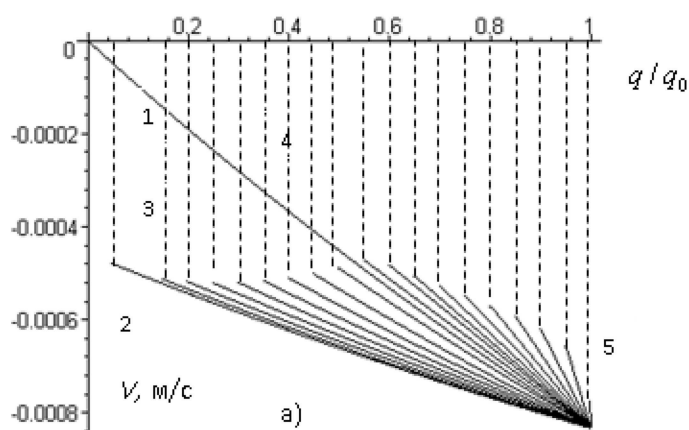


Рис. 2а. Массово-временное распределение скорости:
устойчивый режим

Это соответствует реальной ситуации, наиболее часто встречающейся на практике в СВС-экструзии тугоплавких материалов, когда процесс экструзии заканчивается, в основном, в камере, и происходит выдавливание уже жесткого материала в воздух или направляющий калибр, имеющий диаметр больший, чем диаметр выдавленного стержня. Таким образом, в калибре не происходит доуплотнения и структурирования. Каждый выдавленный бесконечно малый объем имеет в калибре плотность и степень структурирования, приобретаемую при прохождении данного объема через отверстие. Выдавленный стержень движется

с переменной скоростью $V = V(t)$ того элементарного объема, который в рассматриваемый момент времени находится на отверстии. Указанная скорость, следуя закону гидравлического сопротивления, определяется вторым соотношением формулы (17).

Хорошо известны разнообразные эффекты неустойчивого течения полимеров, проявляющиеся при высоких скоростях выдавливания этих материалов из гладких насадок [16]. Рассмотрим результаты исследования решения системы (12)-(18) с граничными условиями (20). В работах [12, 13] приведены теоретические результаты, показывающие, что неустойчивый режим течения может наблюдаться как в области больших скоростей выдавливания, так и малых скоростей. Устойчивый же режим течения реализуется лишь в промежуточном интервале скоростей (рис. 2а,б,в). Скорость выдавливания материала на указанных рисунках $V_0 = -0.000833\text{м/с}$.

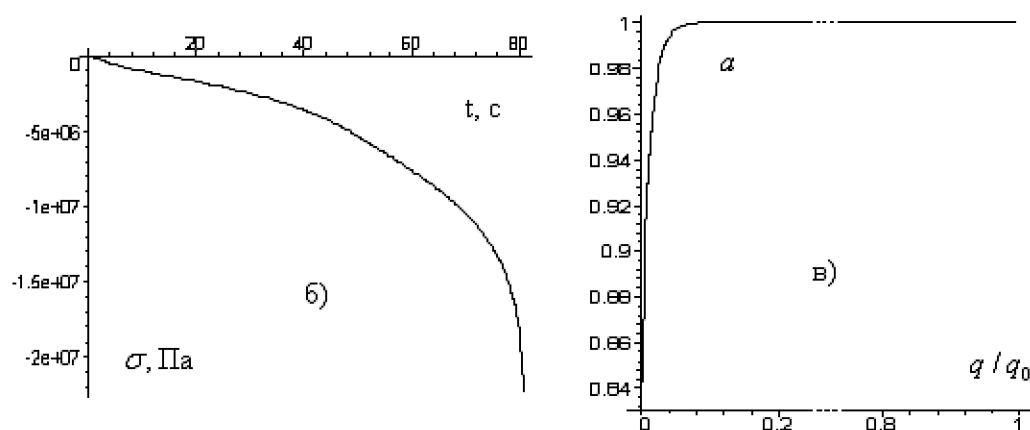


Рис. 2б, в. Динамика напряжения и степени структуризации в камере: устойчивый режим

Это – наиболее благоприятный режим с технологической точки зрения.

На рис. 3а,б,в представлены кривые неустойчивого режима течения при малой скорости выдавливания $V_0 = -0.00004165\text{м/с}$. В рамках предложенной модели неустойчивые режимы деформирования вызваны взаимодействием вязкоупругого деформирования материала с процессом структурных изменений под действием внешних нагрузок. С одной стороны, упругое деформирование материала приводит к росту напряжений, с другой – прогрессивное разрушение структуры материала под действием увеличивающегося напряжения вызывает резкое уменьше-

ние вязкости и связанное с этим падение напряжения. Конкуренция этих факторов и является причиной для возникновения колебаний напряжения и неустойчивости режимов деформирования вязкоупругих структурированных систем. Принципиальным моментом здесь является сильная зависимость вязкости от структурного параметра, которая и обуславливает механизм „обратной связи“. На рис. 3б,в представлено

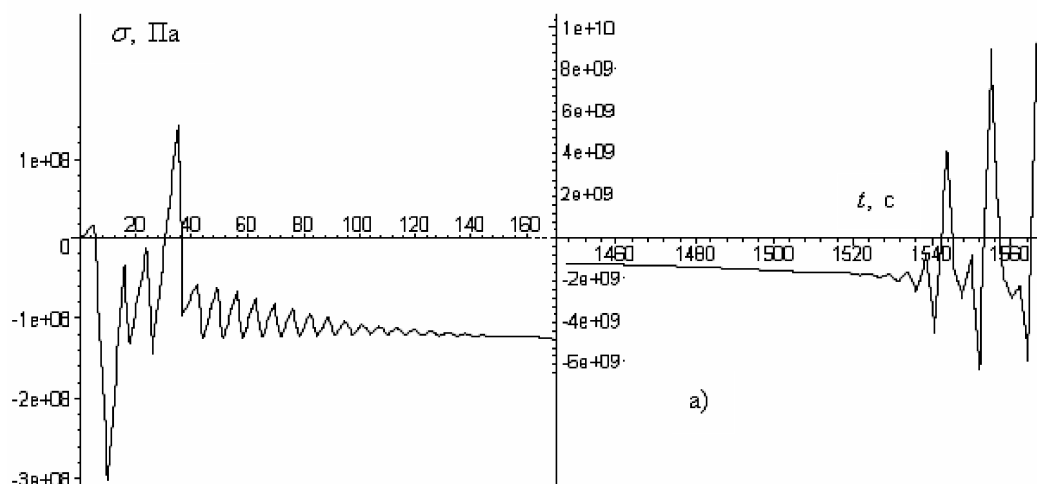


Рис. 3а. Динамика напряжения:
неустойчивый режим при малой скорости

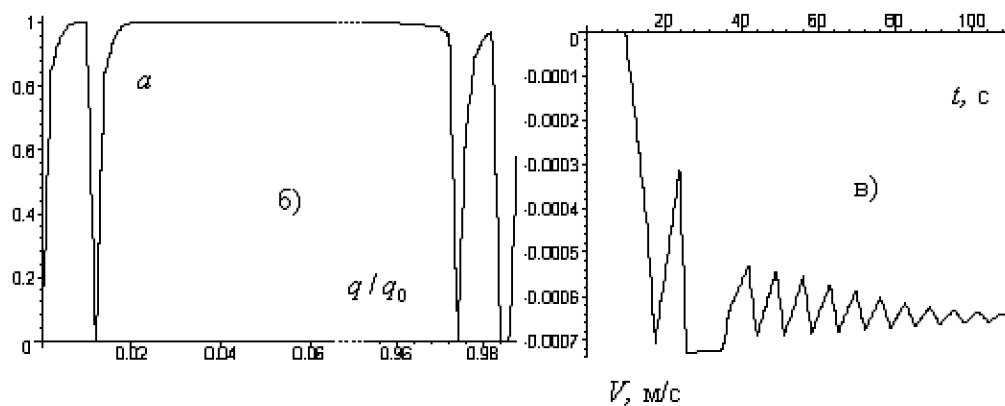


Рис. 3б,в. Изменение степени структуризации и скорости в калибре:
неустойчивый режим при малой скорости

изменение степени структуризации материала и скорости выдавленного в калибр стержня в рассматриваемом неустойчивом режиме.

Неустойчивость при большой скорости ($V_0 = -0.00833$ м/с) деформирования среды демонстрируется рис. 4а, б: колебания напряжения вызывают колебания вязкости, обусловленные сильной зависимостью последней от степени структурирования.

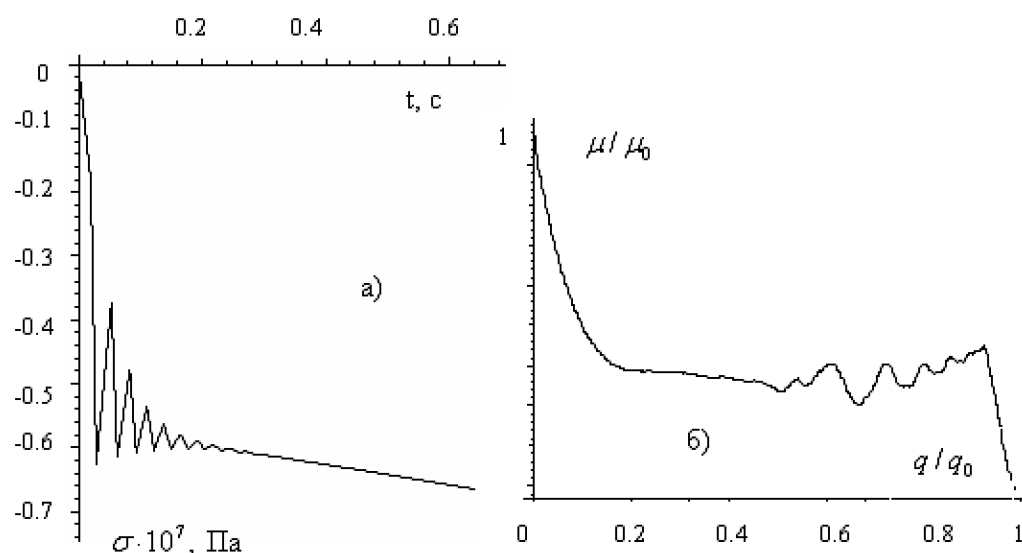


Рис. 4а, б. Динамика напряжения и вязкости: неустойчивый режим при большой скорости

Обнаруженная впервые на основе представленной математической модели возможность неустойчивости при малых скоростях выдавливания указывает на важность проведенных исследований для определения оптимальной области технологических параметров экструзии.

Литература

1. Беляева Н. А., Клычников Л. В. и др. Напряженное состояние при формировании цилиндрического изделия в ходе параллельного протекания реакций полимеризации и кристаллизации // *Механика композитных материалов*. 1991. № 6. С. 1091–1099.
2. Беляева Н. А., Беляев Ю. Н. Регулирование уровня внутренних напряжений формируемого изделия в ходе совмещенного процесса полимеризации и кристаллизации // *Вестник Сыктывкарского университета*. Вып. 1. 1995. С. 119–127.

3. **Беляева Н. А., Клычников Л. В.** Метод интегрального уравнения в задаче объемного отверждения // *Вестник Сыктывкарского университета. Вып. 2. 1996. С. 125–134.*
4. **Беляева Н. А., Гитова Н. Н., Юркина Е. А.** Модель фронтального отверждения цилиндрического изделия с точки зрения непрерывно наращиваемого твердого тела // *Тр. Сыктывкарский лесной институт. Т. 1. 1997. С. 44–52.*
5. **Беляева Н. А., Паршукова Н. Н.** Термовязкоупругая модель отверждения сферического изделия // *Вестник Сыктывкарского университета. Сер. 1. Вып. 4. 2001. С. 115–124.*
6. **Беляева Н. А.** Вязкоупругая модель отверждения композитного изделия // *Механика и процессы управления: Труды XXXVI Уральского семинара. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. Т. 1. С. 228–235.*
7. **Беляева Н. А., Осипова В. В.** Формирование цилиндрического изделия в ходе объемного отверждения. ОФАП. Свид.об отрасл. регистрации разработки № 7944. 30. 03. 2007.
8. **Беляева Н. А.** Неоднородное течение структурированной жидкости // *Математическое моделирование. 2006. Т. 18. № 6. С. 3–14.*
9. **Беляева Н. А.** Самоорганизация куэттовского течения структурированной жидкости // *Гидродинамика больших скоростей и численное моделирование: Материалы III Международной летней научной школы. Кемерово: ИИТ, 2006. С. 321–326.*
10. **Беляева Н. А., Вербовик А. Н.** Напорное течение структурированной жидкости // *В сб.: Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. Тр. научн. школы акад. В.В. Новожилова. СПб.: СПбГУ, 2005. Вып. 8. С. 151–156.*
11. **Беляева Н. А., Размыслов Р. Ю.** Напорное течение структурированной жидкости // *В сб.: Нелинейные проблемы механики и физики деформируемого твердого тела. Тр. научн. школы акад. В.В. Новожилова. СПб.: СПбГУ, 2005. Вып. 8. С. 186–193.*
12. **Беляева Н. А., Столин А. М., Стельмах Л. С.** Кинетика уплотнения и структуризации в твердфазной экструзии вязкоупругой среды // *Инженерная физика. 2007. № 5. С. 34–41.*

13. **Беляева Н. А., Столин А. М., Стельмах Л. С.** Влияние структуризации на процесс твердофазной экструзии вязкоупругого материала // *XVIII сессия Международной школы по моделям механики сплошной среды. Саратов: Саратовский госуниверситет, 2007. С. 53-56.*
14. **Смолев Л. В., Беляева Н. А.** Экструзия с заданным усилием на плунжере. ОФАП. Свид. об отрасл. регистрации разработки № 7945. 30.03.2007.
15. **Беляева Н. А.** Твердофазная экструзия с условием постоянства скорости плунжера прессы. ОФАП. Свид. об отрасл. регистрации разработки № 7946. 30.03.2007.
16. **Тадмор З., Гогос К.** Теоретические основы переработки полимеров. Пер. с англ. М.: Химия. 1984. 632 с.

Summary

Belyaeva N.A. The structural models of deformation processes

Mathematical models of flow and deformation processes of materials with evolutionarizing structure are presented. The problems spread to wide sphere of structure-sensitive objects – from powder systems to polymer materials and composites. This models allow to define change of deformation, temperature and structure characteristics of varried systems in the various processing –hardening, non-Newtonian flow, solid-state extrusion.

Сыктывкарский университет

Поступила 15.01.2008