

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.815-41

Н.С. ПРОКОФЬЕВ

Московский государственный университет леса

Прокофьев Николай Сергеевич родился в 1939 г., окончил в 1963 г. Московский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор кафедры процессов и аппаратов деревообрабатывающих производств. Имеет около 50 печатных трудов в области неразрушающего контроля и экструзии древесных материалов.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКСТРУЗИИ НАПОЛНЕННЫХ РЕАКТОПЛАСТОВ

Приведена математическая модель экструзии наполненных реактопластов, сформулированная в виде системы дифференциальных и интегральных уравнений в соответствии с информационным принципом декомпозиции процесса на элементарные стадии. Модель позволяет, минуя длительные и дорогостоящие натурные испытания, получать необходимую информацию при создании новых технологий и оборудования для экструзионной переработки наполненных реактопластов в изделия с заданными свойствами.

A mathematical model of extrusion of filled thermosetting plastics is given. It is presented as a system of differential and integral equations based on the informational principle of process decomposition into elementary stages. The model allows through avoiding long-term and expensive field testing obtaining necessary information when creating new technologies and equipment for extrusive processing of filled thermosetting plastics into products with specified properties.

Проблема экструзии в шнековых машинах в основном решена для термопластичных материалов, для реактопластов она изучена недостаточно. Из известных работ в этой области наибольший интерес представляют тео-

ретические исследования неизотермического течения однородных реокинетических жидкостей в трубах и винтовых каналах [1–4]. Однако предложенные в этих работах математические модели не пригодны для наполненных реактопластов, так как последние являются гетерогенными средами, свойства которых зависят не только от температуры и конверсии, но и от концентрации дисперсной фазы (наполнителя). Вместе с тем совершенно не изучены условия связи между свойствами таких сред и макрокинетическими параметрами экструзии.

Отсутствие знаний о закономерностях шнековой экструзии наполненных реактопластов затрудняет, а часто делает невозможным проектирование новых эффективных технологий и высокопроизводительного оборудования для переработки материалов с отверждающимися полимерными матрицами. Решение этой научной проблемы рассматривается в настоящей статье на примере растворов реактопластов (термореактивных полимерных смол), наполненных дисперсными частицами.

Теоретические положения, на основе которых построен комплекс математических моделей экструзионной переработки наполненных растворов реактопластов, включают:

- декомпозицию технологического процесса на элементарные стадии;
- условия связи между элементарными стадиями;
- условия связи между свойствами компонентов композиции и макрокинетическими параметрами процессов переработки;
- кинетические закономерности отверждения растворов термореактивных полимеров;
- ограничения по технологическим параметрам формования и тепловой обработки.

При моделировании экструдер рассматривается как закрытая подсистема, которая обменивается с окружающей средой только энергией в форме теплоты. Удаление растворителя из реактопласта осуществляется за его пределами в конвективной сушилке. Совокупность этих аппаратов (подсистем) образует единую систему, декомпозиция которой включает следующие элементарные стадии: транспортирование ($j = 1$), сжатие ($j = 2$), дозирование ($j = 3$), формование ($j = 4$), сушка ($j = 5$) и термозакалка ($j = 6$). Последние две стадии в настоящей работе не рассматриваются.

Для установившегося режима экструзии условия связи ее элементарных стадий имеют следующий вид:

$$Q_j = Q_0; \quad (1)$$

$$Q_{ij} = Q_j \quad b_i; \quad (2)$$

$$\sum b_i = 1; \quad (3)$$

$$\sum Q_{ij} = 0; \quad (4)$$

$$\sum \Delta P_j = 0; \quad (5)$$

$$\Delta P = \Delta P_r. \quad (6)$$

В зависимости от величины внешней нагрузки и рецептуры наполненные реактопласты находятся в различных состояниях. Если объемная доля смолы меньше пористости скелета, состоящего из частиц наполнителя, смесь способна деформироваться под действием сжимающих усилий и по своим свойствам является сыпучим материалом. Если смола полностью за-

полняет полости между частицами наполнителя, смесь несжимаема, и ее пористость равна нулю. В таком состоянии смесь рассматривают как высоконаполненную суспензию с реологическими свойствами бингамовской жидкости. Переход наполненного реактопласта из сыпучего состояния в несжимаемую жидкость происходит на границе между зонами сжатия и дозирования. Условие связи этих стадий имеет вид

$$P_j = 0 \quad \text{при } j = 3. \quad (7)$$

Условия связи между макрокинетическими параметрами экструзии (поля температуры, давления, конверсии) и свойствами экструдата определяются зависимостью между составом, свойствами компонентов и динамикой их изменения в процессе переработки. Данное положение является основной концепцией прогнозирования свойств композитов, которая зависит от начальных свойств компонентов, рецептуры композиции и условий ее переработки в изделие.

Композицию рассматривают как трехфазную систему, состоящую из частиц наполнителя, раствора полимера и газа в порах. Объемные доли фаз изменяются в соответствии с распределением по длине канала температуры и давления. Температурные изменения теплофизических и механических свойств компонентов наполнителя являются обратимыми. Для полимерной матрицы аналогичные свойства изменяются необратимо при конверсии.

При описании изменения пористости реактопласта под воздействием давления и температуры предлагается использовать систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= 1 - (1 - P_0)(p/p_0)^n; \quad P_0 = 1 - \rho_0/\rho_T; \\ n_1 &= n_{01} \exp[\alpha_T(T - T_0) + \alpha_u(u - u_0) + \alpha_d(1 - d/d_0)]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Изменение теплофизических свойств реактопластов в процессе их переработки определяется глубиной конверсии. Предлагается рассматривать раствор термореактивной смолы как трехкомпонентную среду, состоящую из золь- и гель-фракций и растворителя. Теплофизические свойства компонентов зависят только от температуры, а их массовые доли – только от конверсии.

В исходном состоянии смола является раствором золь-фракции. При конверсии содержание золь-фракции непрерывно уменьшается в результате образования нерастворимой гель-фракции. Массовая доля последней на произвольной стадии переработки равна $k_s \eta$. При экструзии теплофизические свойства наполненного реактопласта связаны с параметрами переработки через пористость, плотность компонентов и температурные зависимости: $c_s(T)$, $c_r(T)$, $c_g(T)$, $c_p(T)$, $\lambda_p(T)$, $\lambda_m(T)$ и $\lambda_m^*(T)$. Для плотности и теплоемкости эта связь имеет вид

$$\rho_j = \begin{cases} (1 - P_{1j})\rho_p + a_{mj}\rho_{mj} + (P_{1j} - a_{mj})\rho_{г.п} & \text{при } a_{mj} < P_{1j}; \\ (1 - a_{mj})\rho_p + a_{mj}\rho_{mj} & \text{при } a_{mj} \geq P_{1j}; \end{cases} \quad (9)$$

$$c_j = c_{mj} b_m + (1 - b_m) c_{pj}. \quad (10)$$

Параметры a_{mj} , ρ_{mj} , c_{mj} , входящие в выражения (9) и (10), находят по уравнениям

$$a_{mj} = \begin{cases} \frac{b_m \rho_p (1 - \Pi_{1j})}{\rho_{mj} (1 - b_m)} & \text{при } a_{mj} < \Pi_{1j}; \\ \frac{b_m \rho_p}{b_m \rho_p + (1 - b_m) \rho_{mj}} & \text{при } a_{mj} \geq \Pi_{1j}; \end{cases} \quad (11)$$

$$\rho_{mj} = \frac{1}{\frac{\eta k_s}{\rho_r} + \frac{(1 - \eta) k_s}{\rho_3} + \frac{1 - k_s}{\rho_r}}; \quad (12)$$

$$c_{mj} = c_r \eta k_s + c_3 (1 - \eta) k_s + (1 - k_s) c_r. \quad (13)$$

Теплопроводность наполненного реактопласта определяется согласно теории обобщенной проводимости:

$$\lambda_x = \lambda_j^* \left[\gamma^2 + \nu (1 - \gamma)^2 + \frac{2\nu\gamma(1 - \gamma)}{\nu\gamma + 1 - \gamma} \right], \quad (14)$$

где $\lambda_j^* = \lambda_{pj} \left[1 - \frac{a_{mj}}{1/(1 - \nu_1) - (1 - a_{mj})/3} \right];$

$$\nu_1 = \lambda_{mj} / \lambda_{pj};$$

$$\gamma = 0,5 + A \cos(\phi/3), \quad 1,5 \pi \leq \phi \leq 2,0\pi;$$

$$A = -1, \quad \phi = 2\pi - \arccos(1 - 2\Pi) \quad \text{при } 0 < \Pi \leq 0,5;$$

$$A = 1, \quad \phi = 2\pi - \arccos(2\Pi - 1) \quad \text{при } 0,5 < \Pi \leq 1,0;$$

$$\Pi = \Pi_1 - a_m;$$

$$\nu = \lambda_{r,n} / \lambda^*.$$

Изменение механических свойств наполненных реактопластов в процессе переработки обусловлено аналогичными причинами. При идеальном адгезионном контакте, отсутствии остаточных напряжений и допущении о линейности диаграммы напряжение–деформация для каждого компонента прочность макроизотропного композита определяется когезионной прочностью полимерной матрицы σ_{pm} и ее жесткостью. Частицы наполнителя рассматривают как дефекты структуры полимера, снижающие его прочность в результате концентрации напряжений на границе раздела:

$$\sigma_p = \sigma_{pm} / K_1; \quad (15)$$

$$K_1 = \frac{1 - a_p (1 - E_m / E_p)}{1 - (4a_p / \pi)^{1/2} (1 - E_m / E_p)}. \quad (16)$$

Эффективный модуль упругости реактопласта связан с его пористостью уравнением

$$E = E_m(1 - \Pi^{2/3}) \left[1 + \frac{a_p}{[\kappa / (\kappa + n^{2/3} - 1)] - a_p^{1/3}} \right], \quad (17)$$

где $\kappa = E_p / E_m$.

Состояние реактопласта при его отверждении в растворе предлагается оценивать по количеству связанного растворителя.

Образование химических связей между макромолекулами реактопласта в результате конверсии приводит к уменьшению числа активных центров, в сольватных оболочках которых содержится связанная влага. Максимальное количество связанной влаги присутствует в золь-фракции полимера n_0 , минимальное – в гель-фракции n_r . Параметры n_0 и n_r – физические константы для данной марки термореактивной смолы. Единственной переменной является количество связанной влаги в отвержденной смоле n . Ее текущее значение для всех точек пространства, заключенного в объеме реактопласта, определяет конверсионное поле $\eta(t, x, y, z)$.

При определении скорости конверсий предложена следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\eta}{dt} &= [\bar{n}_\infty(T) - \eta]^m k_{02}(T) n_0^{m-1} k_w^{1-m}; \\ \bar{n}_\infty(T) &= \bar{n}_\infty^* \exp[L(T - T_0)]. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Винтовой канал экструдера моделируется двумя пластинами: нижняя – неподвижная, верхняя – перемещающаяся. Между ними находится экструдат. В зоне сжатия неподвижная пластина располагается под углом, который равен углу конуса сердечника червяка. В зоне дозирования пластины параллельны (рис. 1).

При построении математической модели экструзии принимали следующие допущения: движение реактопласта установившееся; червяк теплоизолирован; в зоне сжатия материал является сыпучим телом, в зоне дозирования – несжимаемой бингамовской жидкостью; переноса теплоты и массы в продольном направлении (ось x) нет; боковые стенки канала не оказывают влияния на движение среды; реактопласт прилипает к корпусу экструдера и может скользить по поверхности червяка как в ту, так и в другую сторону.

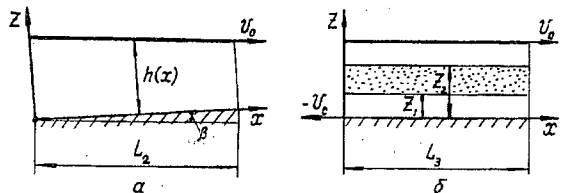


Рис. 1. Плоская модель винтового канала экструдера: а – зона сжатия; б – зона дозирования

С учетом принятых допущений математическая модель экструзии наполненных растворов реактопластов имеет следующий вид.

1. Зоны питания ($j = 1, \operatorname{tg}\beta = 0$) и сжатия ($j = 2, \operatorname{tg}\beta > 0$):
уравнение расхода

$$Q_m = \alpha_p \rho N \frac{\operatorname{tg} \Phi \operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \Phi + \operatorname{tg} \psi}; \quad (19)$$

уравнение напряжений

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} = 0; \quad |\sigma_{zx}| = f \sigma_z; \quad \sigma_z = \xi \sigma_x; \quad (20)$$

уравнение теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right); \quad (21)$$

краевые условия

$$\left. \begin{aligned} \text{при } x = 0 \quad \sigma_x = \sigma_{x_0} = p_0; \\ T(z, 0) = T_{II} = \text{const}; \\ \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = 0; \\ \pi N D f_1 p \frac{\sin \Phi}{\sin(\Phi + \psi)} - \lambda_1 \frac{\partial T(h, t)}{\partial z} + \lambda_2 \frac{\partial T_1(h_1, t)}{\partial z} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

2. Зона дозирования ($j = 3, \operatorname{tg}\beta = 0$):

уравнение движения

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z}; \quad \frac{\partial p}{\partial z} = 0; \quad (23)$$

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0;$$

реологическое уравнение

$$\sigma_{zx} = \mu_3 \frac{dV_x}{dz}; \quad \mu_3 = \mu_p(T, \eta, a_p) + \tau_0(T, \eta, a_p) \left(\frac{dV_x^2}{dz} \right)^{1/2}; \quad (24)$$

условия смены режимов течения:

без ядра

$$\frac{dp}{dx} < \frac{2\mu_p V_0}{h^2}, \quad \tau_0 < \pm \sigma_{\text{тр}}; \quad (25)$$

с ядром внутри потока

$$\frac{dp}{dx} > \frac{2\tau_0 h + \mu_p V_0 + D^{1/2}}{h^2}; \quad \frac{dp}{dx} > \frac{\tau_0 \pm \sigma_{\text{тр}}}{h}; \quad (26)$$

ядро примыкает к поверхности червяка

$$\left. \begin{aligned} \frac{2\tau_0 h + \mu_p V_0 - D^{1/2}}{h^2} < \frac{dp}{dx} < \frac{2\tau_0 h + \mu_p V_0 + D^{1/2}}{h^2}; \\ D = \mu_p^2 V_0^2 + 4\mu_p V_0 \tau_0 h; \quad -\tau_0 \pm \sigma_{\text{тп}} > 0; \\ \frac{dp}{dx} < (\tau_0 \pm \sigma_{\text{тп}}) / h; \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

границы ядра

$$z_2 = h - [2\mu_p V_0 / (dp/dx)]^{1/2}; \quad z_1 = z_2 - 2\tau_0 / (dp/dx). \quad (28)$$

условия на границах ядра

$$\sigma_{zx} = -\tau_0 \text{ при } z = z_2; \quad \sigma_{zx} = \tau_0 \text{ при } z = z_1; \quad (29)$$

уравнение энергии

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \sigma_{zx} \frac{\partial V_x}{\partial z} + b_m \rho \Delta H \overline{W}_r \overline{M}_0; \quad (30)$$

уравнение конвективного массообмена

$$V_x \frac{\partial \eta}{\partial x} + \overline{W}_r = 0; \quad (31)$$

краевые условия

$$\left. \begin{aligned} V_x(0) = 0 \text{ при } \sigma_{zx} < p f_{02} \exp[-\beta_2(T - T_0)]; \\ V_x(0) = V_c \text{ при } \sigma_{zx} = p f_{02} \exp[-\beta_2(T - T_0)]; \\ V_x(h) = V_0; \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

$$T(z, 0) = T_1^* = \text{const}; \quad \frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T(h, t)}{\partial z} = -\frac{\alpha}{\lambda_1} (T - T_{\text{ст}}) \text{ при } t = 0, x = 0 \text{ и } \eta = 0. \quad (33)$$

Технологические режимы экструзии наполненных реактопластов имеют ограничения по температуре, давлению и продолжительности пребывания материала в формующем канале; внутри канала не должно быть «горячих точек», в которых возможна термодеструкция полимера; давление не должно превышать механическую прочность стенок корпуса экструдера; внутри канала недопустим переход реактопласта в гелеобразное состояние.

Все ограничения имеют вид неравенств

$$T < T_d; \quad p < p^*; \quad t < t_{\text{гел}}^*. \quad (34)$$

Система уравнений (22)–(34) достаточно строго описывает движение наполненного реактопласта в канале экструдера при наличии тепло- и массообмена и химической реакции отверждения. Поля напряжений, скоростей, температуры и конверсии являются взаимосвязанными. В зоне дозирования эта связь реализуется при помощи функций $\tau_0(T, \eta, a_p)$ и $\mu_p(T, \eta, a_p)$.

Для описания реокинетических свойств наполненных реактопластов предлагается использовать совокупность определяющих соотношений вида

$$\left. \begin{aligned} \mu_p &= \mu_p^* F_1(T) F_2(\eta) F_3(a_p); \\ \tau_0 &= \tau_0^* \bar{F}_1(T) \bar{F}_2(\eta) \bar{F}_3(a_p). \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Вид функций, описывающих влияние температуры, конверсии и наполнителя на пластическую вязкость μ_p и предел текучести τ_0 реактопласта, определяются экспериментально. Для этого выбирают стандартные условия опыта ($T_0 = 293$ К, $\eta_0 = 0$, $a_{p0} = 0,7$), при которых все функции равны единице. Исследования проводят при последовательном варьировании параметров. Каждая функция исследуется независимо в результате фиксирования остальных на уровне единицы.

Замыкающие уравнения модели по механическим свойствам компонентов реактопласта предложено представлять в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} E_m &= E_{m_0} f_1'(u) f_2'(\eta) f_3'(T); \\ G_m &= G_{m_0} f_1''(u) f_2''(\eta) f_3''(T); \\ \sigma_{pm} &= \sigma_{pm_0} f_1^*(u) f_2^*(T) f_3^*(\eta); \\ E_p &= E_{p_0} F_1'(u) F_2'(T); \\ G_p &= G_{p_0} F_1''(u) F_2''(T). \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Стандартные условия эксперимента по температуре и конверсии для функций (35) и (36) совпадают. Значение влагосодержания u_0 , при котором соответствующие функции в (36) вырождаются в единицу, принимается равным пределу гигроскопичности материала. Кроме (35) и (36), в математическую модель экструзии входят другие определяемые экспериментально зависимости и параметры: ΔH , k_{02} , E , n_{01} , n_0 , n_r , k_w , ρ_0 , ρ_p , ρ_r , ρ_z , ρ_r , ξ , α_T , α_w , α_d , $n_\infty(T)$, $f(T)$, $c_3(T)$, $c_r(T)$, $c_f(T)$, $c_p(T)$, $\lambda_p(T)$, $\lambda_m(T)$, а также параметры внешнего и внутреннего тепло- и массообмена.

Тестовые испытания проводили на композициях из древесных опилок, фосфогипса и водного раствора карбамидного олигомера. Сравнивали расчетные и экспериментальные значения температуры в различных сечениях канала экструдера, давления, теплофизических и механических свойств композита. Проверка показала, что экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетным.

В результате испытаний получены зависимости $v(z)$, $T(x)$, $p(x)$ и $\eta(x)$, а также напорно-расходные характеристики для различных N и условий теплообмена с окружающей средой (рис. 2).

Вид поля скоростей при прочих равных условиях зависит от градиента давления. При малых расходах в потоке композиции возникает ядро, которое примыкает к поверхности шнека. При $\sigma_{\tau} < \sigma_{zx}$ оно начинает скользить по его поверхности. Максимальная скорость скольжения наблюдается при работе экструдера в режиме полностью открытого выхода.

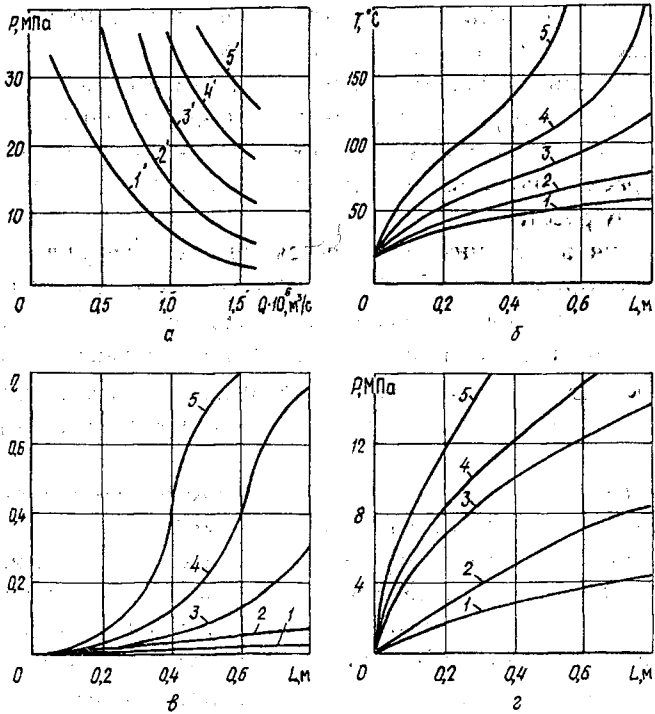


Рис. 2. Напорно-расходная характеристика при $Q = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (а) и распределение по длине канала температуры (б), конверсии (в) и давления (г) в процессе адиабатической экструзии композиции, состоящей из 30 % карбамидоформальдегидной смолы и 70 % фосфогипса, при различных значениях N : 1' - $0,3 \text{ с}^{-1}$; 2' - $0,4$; 3', 1 - $0,5$; 4', 2 - $0,6$; 5', 3 - $0,7$; 4 - $0,8$; 5 - $0,9 \text{ с}^{-1}$

Тепловой режим экструдера определяется диссипативным фактором и внешним теплообменом. Диссипативный разогрев зависит от частоты вращения шнека, расхода и эффективной вязкости композиции. Так как последний показатель зависит от температуры смеси и конверсии, то и диссипативный фактор отслеживается этими же показателями.

Температура и конверсия являются конкурирующими параметрами диссипативного источника теплоты. С увеличением температуры его роль уменьшается из-за снижения эффективной вязкости, а с увеличением глубины конверсии, наоборот, возрастает.

Вклад химического источника теплоты в изменение температуры смеси незначителен, и его можно не учитывать. При малой частоте вращения шнека температура смеси монотонно растет по длине канала и стремится к некоторому предельному значению. Этот предельный разогрев зависит от расхода: чем больше расход, тем меньше темп нагрева смеси и ее конечная температура. При фиксированной частоте вращения шнека для адиабата-

тического экструдера существует критический расход, ниже которого происходит лавинообразное нарастание температуры.

С увеличением частоты вращения шнека при постоянном расходе возрастает интенсивность механического источника теплоты; критический расход, при котором наступает тепловое воспламенение смеси, увеличивается. Если расход не меняется, то воспламенение происходит на более близком к входу расстоянии.

Аналогичная картина наблюдается при увеличении в смеси массовой доли древесных опилок: чем больше опилок в смеси, тем меньше (при прочих равных условиях) допустимая частота вращения шнека адиабатического экструдера. Тепловое воспламенение смеси в экструдере можно устранить за счет теплосъема. Чем меньше $T_{ст}$ и больше α , тем меньше вероятность возникновения теплового воспламенения внутри винтового канала экструдера и наоборот.

Аналогично влияет на параметрическую устойчивость работы экструдера и начальная температура формуемой смеси.

Изменение конверсии термореактивной смолы по длине винтового канала зависит от времени пребывания композиции в экструдере и температуры. При открытом выходе канала она незначительна, так как в этих условиях продолжительность пребывания и температура смеси малы. Введение в состав композиции древесных опилок не влияет на $\eta(x)$. С увеличением частоты вращения шнека и уменьшением расхода глубина конверсии начинает резко нарастать, что приводит к потере тепловой устойчивости экструдера и его закупорке.

Изменение реологических свойств смеси по длине канала за счет неизотермичности и конверсии является причиной появления нелинейного профиля давления.

На начальном участке канала наиболее сильно изменяется температура, а конверсия невелика из-за малой продолжительности пребывания. Поэтому здесь характерным является сильное падение градиента давления и нелинейный рост p .

По мере продвижения смеси к выходу канала темп ее нагрева в адиабатических условиях замедляется, а конверсия возрастает. При определенных расходах может наступить момент, когда градиент давления на выходе канала начнет увеличиваться, в результате происходит лавинообразное нарастание давления в канале. На практике это отвечает условиям закупорки формуемого канала, когда смесь теряет свойство текучести.

Продольный профиль давления изменяется при теплообмене с окружающей средой. Расчеты показывают, что регулировать давление перед формующей головкой при постоянном N целесообразно путем охлаждения начального участка канала и нагрева последующего. Такая комбинация охлаждение-нагрев по зонам канала экструдера устраняет перегрев смеси (тепловое воспламенение) и снижает вероятность преждевременной потери ее текучести за счет конверсии смолы. На практике это прослеживается при

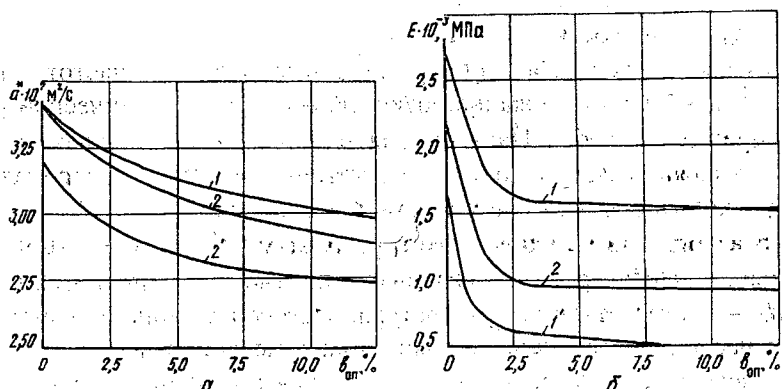


Рис. 3. Влияние содержания древесных опилок и режима работы экструдера на коэффициент температуропроводности a^* (а) и модуль упругости E (б) экструдата ($b_m = 0,3$): 1, 2 – политропический экструдер ($T_{ст} = 293 \text{ K}$, $\alpha = 150 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{K})$); 1', 2' – адиабатический экструдер; 1, 1' – $N = 1,0 \text{ с}^{-1}$; 2, 2' – $N = 1,2 \text{ с}^{-1}$

малых расходах, когда формируются изделия сложного профиля с тонкими стенками.

Макрокинетические параметры экструзии и состав композиции оказывают существенное влияние на физико-механические свойства экструдата. Изменение некоторых из них для экструдата из древесно-фосфогипсополимерных композиций при различных режимах работы экструдера показано на рис. 3. Полученные данные подтверждают необходимость при проектировании новых композиционных материалов учитывать условия их изготовления.

Таким образом, тестовые испытания показали, что предлагаемая система уравнений позволяет правильно моделировать неізотермическое течение наполненных реактопластов в винтовых каналах. Ее можно использовать при решении задач оптимального проектирования новых технологий экструзионной переработки подобных материалов в изделия с заданными свойствами.

Условные обозначения

a – объемная доля; b – массовая доля; B – ширина канала, м; G – модуль сдвига, Па; D – диаметр шнека, м; f – коэффициент трения; Φ – угол транспортирования, град; ψ – угол нарезки червяка, град; c – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); α_p – коэффициент расхода, $1/\text{м}^3$; η – глубина конверсии реактопласта; η_∞ – предельная конверсия реактопласта; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ – напряжения, Па; ξ – коэффициент бокового распора; p – давление, Па; k_s – концентрация смолы, $\text{кг}/\text{кг}$; k_{02} – кинетический коэффициент реакции отверждения, $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$; k_w – число молекул воды в сольватной оболочке функциональной группы макромолекулы реактопласта, моль/моль; K_1 – коэффициент концентрации нормальных напряжений; Π – пористость;

P_1 – пористость брикета из наполнителя; v – скорость, м/с; T – температура, К; E – модуль упругости, Па; ΔH – тепловой эффект реакции, Дж/моль; μ_p – пластическая вязкость, Па·с; Q – расход, м³/с, кг/с; N – частота вращения шнека, с⁻¹; u – влагосодержание, кг/кг; W_r – скорость химической реакции, с⁻¹; τ_0 – предел текучести, Па; t – время, с; p, m, n, r, g, z – индексы, соответственно относящиеся, к наполнителю, матрице, порам, растворителю, гель- и золь-фракциям смолы; i – номер компонента реактопласта; Q_0 – массовый расход реактопласта на входе в экструдер, кг/м³; ρ_T – плотность частиц наполнителя, кг/м³; ρ_0 – насыпная плотность наполнителя, кг/м³; T_0, u_0, d_0 – соответственно температура, влагосодержание и эквивалентный диаметр частиц наполнителя, условно принятые за начало отсчета, К, кг/кг, м; P_0 – насыпная пористость наполнителя; n_1 – коэффициент, учитывающий влияние температуры, влагосодержания и размера частиц наполнителя на пористость брикета в зоне сжатия; n_{01} – то же, но при условиях, принятых за начало отсчета; $\alpha_T, \alpha_w, \alpha_d$ – температурный, влажностный и структурный коэффициенты деформативности брикета из наполнителя, 1/К, кг/кг, 1/м; d – эквивалентный диаметр частиц наполнителя, м; p_0 – атмосферное давление, Па; L – температурный коэффициент предельной конверсии, 1/К; T_n – начальная температура реактопласта на входе в экструдер, К; f_1 – коэффициент кинематического трения на подвижной пластине; λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности реактопласта и подвижной пластины, Вт/(м·К); V_x, V_z – компоненты вектора скорости течения реактопласта в зоне дозирования, м/с; μ_s – эффективная вязкость реактопласта, Па·с; $\sigma_{тр}$ – напряжение трения, Па; V_0 – скорость перемещения подвижной пластины, м/с; V_c – скорость скольжения реактопласта по поверхности шнека, м/с; T_1^* – температура реактопласта на входе в зону дозирования, К; $T_{ст}$ – температура стенки формирующего канала, К; T_d – температура деструкции реактопласта, К; p^* – допустимое давление в канале экструдера, Па; $t_{гн}^H$ – продолжительность гелеобразования реактопласта при неизотермическом нагреве, с; μ_p^* – коэффициент пластической вязкости реактопласта при стандартных условиях, Па·с; τ_0^* – предел текучести реактопласта при стандартных условиях, Па.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Боярченко В.И. Макрокинетическая теория экструзии полимерных и полимеризующихся материалов: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. - Черноголовка, 1982. - 33 с. [2]. Малкин А.Я., Баранов А.В., Тябин Н.В. Течение отверждающей неньютоновской жидкости в канале при наличии пристенного скольжения // Теорет. основы хим. техн. - 1991. - № 1, 25. - С. 72-79. [3]. Deby H.G. Laminar flow a thermosetting polymer through a coat-hanger die // Polym. Process Engng. - № 2-4, Vol. 4. - 1986. - P. 151. [4]. Freaklay P.K., Patel S.R. Internal mixing the interpretation of experimentally determined in chamber pressure and temperature profiles // Prok. Am. Chem. Soc. Meeting Rubber. - Div. Huston, 1983. - P. 1.