

УДК 621.315

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ТЕЧЕНИЯ И МЕТОДИКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЭКСТРУЗИОННОГО НАЛОЖЕНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

А.В. Казаков, Н.М. Труфанова

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

E-mail: ktei@pstu.ru

Показаны основные принципы управления процессом формирования многослойной полимерной изоляции на основании численного решения математической модели исследуемого процесса. Сформулирована математическая модель многослойного течения аномально-вязких расплавов полимеров.

Ключевые слова:

Численное моделирование, многослойное течение расплавов полимеров, управление технологическим процессом.

Key words:

Numerical simulation, multilayer polymer melts flow, process control.

В промышленности в настоящее время все более широкое применение находят кабели с полимерной многослойной изоляцией. Процесс изготовления такой изоляции достаточно сложен и требует соблюдения целого ряда технологических параметров: температурные режимы формования, геометрические размеры слоев изоляции, скорости изолирования, которые в значительной мере определяются свойствами изоляционного материала. Большинство производителей подобной кабельной продукции применяют технологические режимы, определенные лишь на основе собственного практического опыта и рекомендаций производителей экструзионного оборудования. Внедрение автоматизированной системы управления экструзионной линией позволит увеличить производительность при соблюдении ряда условий, обеспечивающих качество получаемого кабеля.

Процесс одновременного наложения многослойной изоляции с заданным уровнем качества требует учета целого ряда факторов, таких как давления, создаваемые экструдерами, линейная скорость движения жилы, температуры подогрева корпуса кабельной головки, температуры расплавов на выходах из экструдеров, температура предварительного подогрева жилы, геометрические размеры и конфигурация каналов, реологические и теплофизические свойства экструдруемых материалов. Ручной подбор совокупности вышеуказанных факторов непосредственно на действующем оборудовании приводит к значительным материально-временным затратам, что неизбежно сказывается на времени отладки и вывода оборудования на рабочий режим и на затратах, связанных с пусконаладочными работами.

С целью минимизации затрат на этапе вывода кабельной линии на рабочий режим целесообразно иметь некоторую заранее разработанную модель поведения процесса. Данная модель должна включать в себя все возможные сочетания влияющих на процесс экструзии факторов, а также оценку действия этих факторов на качество получаемой продукции. Необходимо отметить, что часть пара-

метров, отражающих качество получаемого изделия, можно оценить непосредственно в ходе технологического процесса экструзии (это, например, толщины накладываемых слоев, измеряемые рентгеноскопической установкой), а часть (внутренние перегревы) измерить невозможно. Поэтому разрабатываемая модель процесса должна доопределять некоторые из параметров, по которым можно судить о качестве получаемого изделия.

Для кабельных изделий среднего напряжения значительное влияние на рабочие характеристики оказывает равномерность электрического поля внутри изоляции кабеля. Это позволяет избежать появления «слабых» с точки зрения электрической прочности участков и повышает в целом нагрузочную способность кабеля. Поэтому изоляция таких кабелей не монолитная, а составная, многослойная, рис. 1.

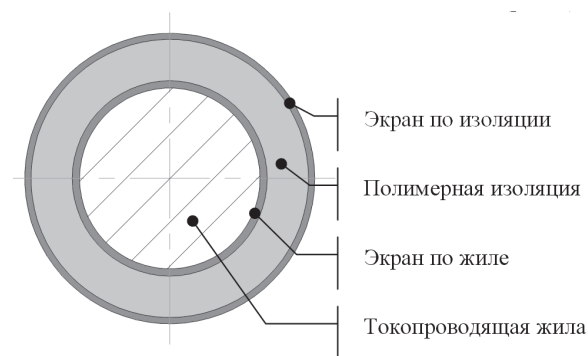


Рис. 1. Структура изоляции высоковольтного кабеля

Для высокого качества изолирующего покрытия важно не допускать попадания между слоями экран-изоляция-экран посторонних включений (пузырьки воздуха, капли воды и прочие инородные тела). Этого можно добиться только одновременным наложением всех трех слоев за один проход, исключая контакт слоев внутреннего экрана и изоляции с окружающей средой.

Конфигурация кабельной головки для одновременного наложения трех слоев изолирующих материалов представлена на рис. 2.

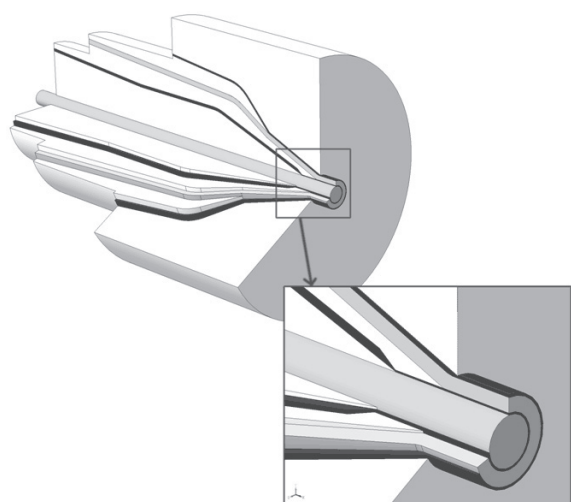


Рис. 2. Конфигурация кабельной головки

Поскольку все каналы коническо-цилиндрические, целесообразно рассматривать геометрию кабельной головки не в декартовой, а в цилиндрической системе координат (r – радиальная и ζ – продольная координаты), рис. 3.

Когда экструзионная линия выходит на рабочий режим, поддерживаются стабильные параметры работы (линейная скорость, давления в каналах, температуры). Поэтому можно считать исследуемый процесс стационарным и непрерывным.

Необходимо отметить, что задача определения оптимального режима экструзии осложняется нелинейными связями между параметрами процесса.

При постановке и решении задач, связанных с управлением какими либо процессами или объектами, важно допускать возможность отличия

входных параметров модели от входных параметров объекта управления. В данном случае это относится к различным коэффициентам, определяющим свойства перерабатываемых материалов. Например, реологические и теплофизические свойства расплавов в действительности могут варьироваться в некоторых пределах [1]. Таким образом, всегда можно определить некоторый вектор неконтролируемых возмущений. В итоге решение задачи параметрической оптимизации может дать набор управляющих воздействий, задание которых не приведет к получению качественного продукта. Естественным подходом к решению означенной проблемы является организация обратной связи при оперативном управлении процессом экструзии с использованием метода параметрической идентификации модели [2].

Заранее строится адаптер, позволяющий на основании упрощенной «рабочей модели» поведения объекта управления оперативно восстанавливать реальные свойства перерабатываемых материалов и определять новые необходимые управляющие воздействия с учетом скорректированных реологических свойств полимеров.

Процесс стратифицированного течения в каналах кабельной головки определяется целым рядом разнохарактерных параметров. Это и геометрия канала, свойства материалов, технологические режимы переработки [3]. Поэтому целесообразно сформулировать задачу управления процессом экструзии на основе математической модели, описывающей происходящие во время процесса явления [4].

Математическое описание процессов теплообмена расплавов полимера при стратифицированном течении основано на законах сохранения.

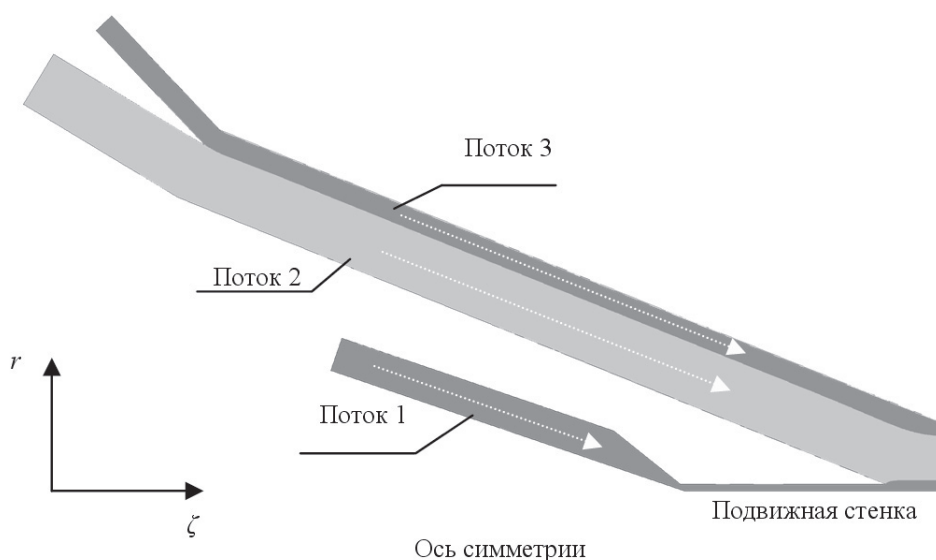


Рис. 3. Каналы истечения полимеров в цилиндрической системе координат

Сделаем ряд допущений:

- процесс стационарный;
- среда несжимаемая, без упругих свойств;
- массовые силы значительно меньше поверхностных;
- течение осесимметричное;
- на границах канала реализуется условия прилипания и непроницаемости;
- теплофизические характеристики постоянны.

В результате сделанных допущений система дифференциальных уравнений [5] для каждого из слоев потока в скоростях имеет следующий вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu_{\text{э}}^i \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{2\mu_{\text{э}}^i}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{r^2} \mu_{\text{э}}^i v_r + \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\text{э}}^i \left(\frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) \right] = \frac{\partial P}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\text{э}}^i \left(\frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) \right] + \frac{\mu_{\text{э}}^i}{r} \left(\frac{\partial v_\zeta}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(2\mu_{\text{э}}^i \frac{\partial v_\zeta}{\partial \zeta} \right) = \frac{\partial P}{\partial \zeta}, \quad (3)$$

$$\rho^i C^i \left(v_r \frac{\partial T}{\partial r} + v_\zeta \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda^i \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\lambda^i \frac{\partial T}{\partial \zeta} \right) + \Phi, \quad (4)$$

где индекс i — определяет номер слоя в потоке и соответствующий ему материал; r, ζ — радиальная и продольная цилиндрические координаты; v_r, v_ζ — компоненты вектора скорости; Φ — диссипативный источник тепла; P — давление; T — температура; ρ — плотность; C — теплоемкость; λ — теплопроводность; $\mu_{\text{э}}$ — эффективная вязкость, являющаяся функцией скорости сдвига и температуры:

$$\mu_{\text{э}} = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \left(\frac{I_2}{2} \right)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (5)$$

где μ_0 — начальная вязкость при T_0 ; β — температурный коэффициент вязкости; n — коэффициент аномалии вязкости; I_2 — второй инвариант тензора скоростей деформации.

Необходимость учета зависимости вязкости расплава полимера от температуры показана в [6].

Реологические свойства исследуемых расплавов полимеров были получены в ходе серии натурных экспериментов с применением ареометра Discovery HR-2, физические параметры, такие как плотность, теплоемкость и теплопроводность — по данным изготовителя.

Система дифференциальных уравнений (1)–(5) замыкалась следующими граничными условиями:

- на неподвижных стенках компоненты скорости равны нулю;

- на границе контакта с подвижной жилой продольная компонента скорости равна скорости движения жилы (0,183 м/с);
- на входе в каналы задавались давления;
- на выходе — граничные условия второго рода по скорости и температуре (исходя из соображений о установившемся процессе на выходе);
- температура неподвижных стенок каналов 443 К;
- температура расплавов полимеров на выходе из экструдеров 423 К (измерялась при помощи термодатчиков, встроенных в каналы);
- температура подвижной жилы 383 К;
- на границах раздела потоков задавались следующие граничные условия:

— по напряжениям

$$\begin{aligned} (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_1 &= \\ &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_2 &= \\ &= (\tau_{rr} \cos(r, n) + \tau_{r\zeta} \cos(\zeta, n))|_3; \\ (\tau_{rr} \cos(\zeta, n) + \tau_{r\zeta} \cos(r, n))|_1 &= \\ &= (\tau_{rr} \cos(\zeta, n) + \tau_{r\zeta} \cos(r, n))|_2; \\ (\tau_{rr} \cos(\zeta, n) + \tau_{r\zeta} \cos(r, n))|_2 &= \\ &= (\tau_{rr} \cos(\zeta, n) + \tau_{r\zeta} \cos(r, n))|_3; \end{aligned} \quad (6)$$

— по скоростям

$$\begin{aligned} v_r|_1 &= v_r|_2; & v_\zeta|_1 &= v_\zeta|_2; \\ v_r|_2 &= v_r|_3; & v_\zeta|_2 &= v_\zeta|_3; \end{aligned} \quad (7)$$

— по потокам тепла

$$\begin{aligned} q_r|_1 &= q_r|_2; & q_\zeta|_1 &= q_\zeta|_2; \\ q_r|_2 &= q_r|_3; & q_\zeta|_2 &= q_\zeta|_3; \end{aligned} \quad (8)$$

— по температуре на границах раздела потоков

$$T|_1 = T|_2; \quad T|_2 = T|_3, \quad (9)$$

где индексы 1–3 — номера слоев стратифицированного течения; $\tau_{rr}, \tau_{r\zeta}$ — нормальные и касательные напряжения:

$$\tau_{rr} = 2\mu_{\text{э}} \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \tau_{r\zeta} = \mu_{\text{э}} \left(\frac{\partial v_r}{\partial \zeta} + \frac{\partial v_\zeta}{\partial r} \right), \quad (10)$$

q_r, q_ζ — потоки тепла в направлении соответствующих осей.

Система дифференциальных уравнений (1)–(10) решалась численно, методом конечных элементов. В результате получено решение, с одной стороны удовлетворяющее заданным условиям качества, а с другой — обеспечивающее наивысшую скорость изолирования. При этом задавались различные сочетания давлений на входах в каналы, и контролировались результирующие толщины накладываемых на жилу слоев.

Верификация предложенной математической модели заключалась в сравнении получаемых по ней результатов с результатами численных моделей других авторов и натурных экспериментов.

Решение включало совокупность температурных полей, распределений потоков полимеров в каналах, поля давления, скорости. Возможность построения границы раздела потоков позволила судить о толщине накладываемых на жилу слоев на выходе из кабельной головки, а температурные поля — контролировать внутренние перегревы в толще расплава полимера.

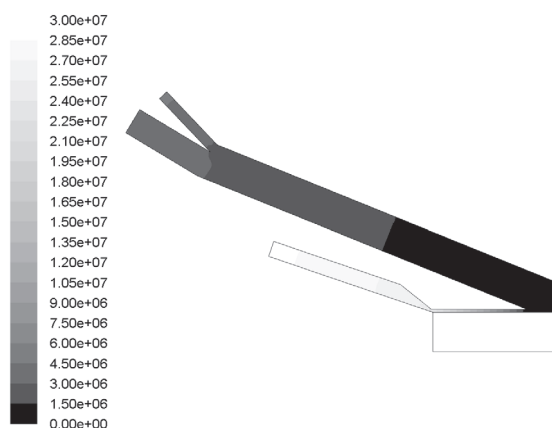


Рис. 4. Поле давления в каналах кабельной головки

На рис. 4 представлено поле давления внутри кабельного канала. Видно, что наиболее нагруженным являлся канал, по которому истекал полимер, образующий внутренний полупроводящий слой по жиле. Это связано с наименьшим поперечным сечением данного канала и с достаточно высокой вязкостью полимера. Давления на входах в каналы составили 28,9; 4,1 и 4,7 МПа соответственно для первого, второго и третьего каналов.

На рис. 5 приведено поле скоростей движения расплава по каналам кабельной головки. Наибольшая скорость потока наблюдалась в самом узком сечении канала (сужение при перетекании материала из канала с неподвижными стенками в канал, одна из стенок которого образована подвижной жилой). Максимальная скорость в этом суженном участке примерно в 2 раза превосходила скорость движения жилы.

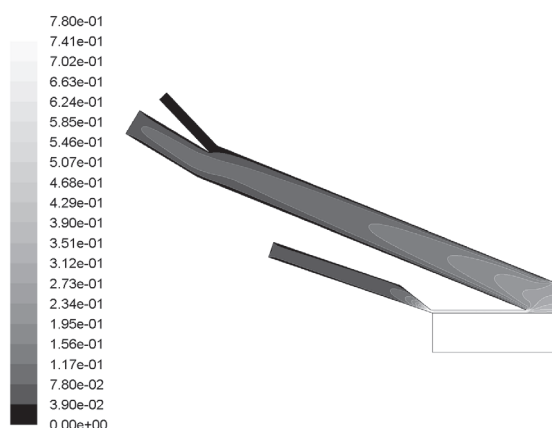


Рис. 5. Поле скоростей в каналах кабельной головки

Анализ температурного поля, рис. 6, показал достаточно равномерный характер прогрева материала

в канале. На выходе полимер практически сохранял температуру расплава, получаемого от экструдера — 423 К, а средняя температура на выходе 426 К. На неподвижных стенках температура соответствовала температуре подогрева кабельной головки, что облегчало движение материала по каналу.

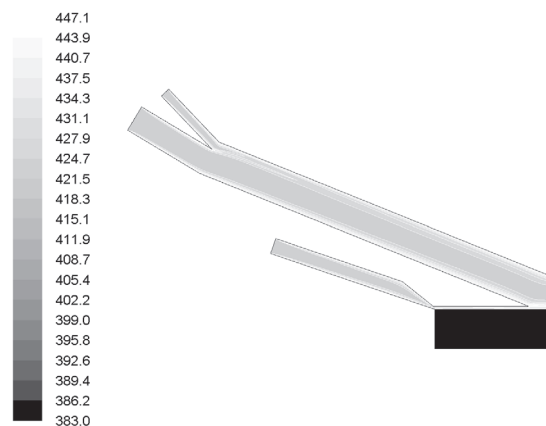


Рис. 6. Поле температур в каналах кабельной головки

Рис. 7 демонстрирует траектории движения расплава полимеров по коническо-цилиндрическим каналам кабельной головки и отражает взаимодействие потоков при их слиянии. На рис. 8 отдельно показаны границы потоков расплавов полимеров. Можно отметить стабильность границ на всем участке взаимодействия потоков, что обеспечивает хорошее качество получаемой многослойной изоляции.

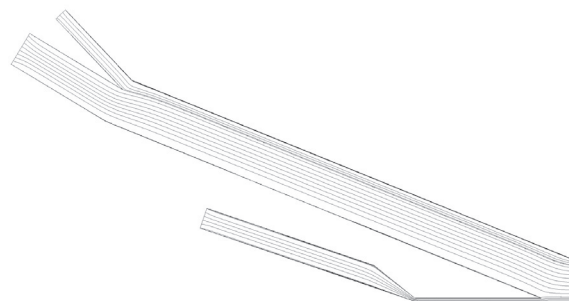


Рис. 7. Распределение потоков материала внутри каналов кабельной головки

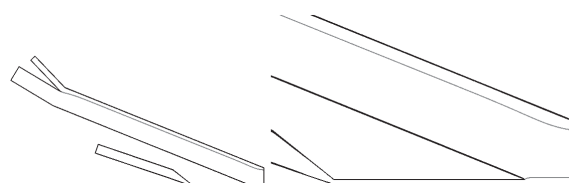


Рис. 8. Границы раздела потоков

Границы потоков позволили определить толщины накладываемых на жилу полимерных полупроводящих и изолирующих слоев.

Таким образом, предлагаемая математическая модель пространственного трехслойного течения anomalно вязких расплавов полимеров с различными теплофизическими и реологическими свойствами, а так же численная ее реализация позволи-

ли рассчитать параметры технологического режима формования электрической изоляции для рассматриваемой геометрии кабельной головки. С использованием описанной модели определены оптимальные параметры технологического процесса, позволившие увеличить производительность линии по формированию трехслойной изоляции при обязательном соблюдении условий качества получаемой продукции. Предлагаемая модель дополни-

тельно позволила заранее рассчитать вероятные реакции процесса наложения на изменение различных параметров (например, внезапно меняющихся свойств перерабатываемых материалов). Это способствует повышению качества выпускаемой продукции и исключению так называемого «человеческого фактора», зачастую являющимся самым слабым звеном всей технологической цепочки производства кабельной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терлыч А.Е., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Адаптивная система управления процессом экструзии при производстве кабельной продукции // Информационные управляющие системы: Сб. науч. тр. / Перм. гос. техн. университет. — Пермь: Пермский ЦНТИ, 2006. — С. 280–284.
2. Столбов В.Ю., Швейкин А.И. Построение системы адаптивного управления процессом восстановления насосных штанг // Механика и процессы управления: Труды XXXIII Уральского семинара. — Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. — С. 338–345.
3. Казаков А.В., Труфанова Н.М. Численное моделирование процесса течения полимера в кабельной головке и анализ зависимости параметров процесса от некоторых теплофизических свойств материала // Вестник ПГТУ. Механика. — 2009. — № 1. — С. 130–136.
4. Казаков А.В., Савченко В.Г., Труфанова Н.М. Расчет влияния геометрии каналов технологического инструмента кабельной головки на возникновение вихревых потоков при наложении изоляции // Кабели и провода. — 2010. — № 2 (321). — С. 11–13.
5. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. — М.: Химия, 1984. — 632 с.
6. Казаков А.В., Савченко В.Г., Труфанова Н.М. Моделирование процессов тепломассопереноса полимера в головке экструдера с учетом и без учета зависимости вязкости от температуры // Интеллектуальные системы в производстве. — 2010. — № 1 (15). — С. 130–133.

Поступила 25.12.2011 г.

УДК 621.315

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ В УСЛОВИЯХ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В ВИНТОВЫХ КАНАЛАХ ЭКСТРУДЕРОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЛАСТМАССОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Е.В. Субботин, А.Г. Щербинин, Н.М. Труфанова

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

E-mail: ktei@pstu.ru

Проведено численное исследование работы экструдера с классической геометрией шнека. Представлены графики распределения давления, изменения минимальной, средней и максимальной температур по длине канала. Приведены картины: изменения формы пробки; распределения температурного поля и компонент скорости в поперечном сечении канала экструдера. Построены напорно-расходные характеристики.

Ключевые слова:

Математическая модель, экструдер, шнек, численное исследование.

Key words:

Mathematical model, extruder, screw, numerical investigation.

В современном кабельном производстве основным способом наложения пластмассовой изоляции является экструзия. Многочисленные исследования, проводимые в данной области, направлены, прежде всего, на модернизацию оборудования и совершенствование технологических режимов. Натурные испытания вследствие большой производительности шнековых аппаратов и высокой цены полимерных материалов превращаются в дорогостоящую и продолжительную работу. Кроме то-

го, с помощью эксперимента сложно выявить некоторые скрытые особенности изучаемого процесса. Например, определить области локальных перегревов, что является важным при рассмотрении процессов переработки современных полимерных материалов, обеспечение высоких эксплуатационных характеристик которых может быть достигнуто только при строгом соблюдении заданных температурных режимов. Это вызывает необходимость развития теоретических основ исследуемых про-