

На правах рукописи



Третьяков Илья Викторович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК В УСЛОВИЯХ
ДВУХОСНОГО РАСТЯЖЕНИЯ С УЧЕТОМ
ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», на кафедре высшей математики

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Пышнограй Григорий Владимирович

Официальные оппоненты:

Богомоллов Александр Романович, доктор технических наук, доцент, вед. н. с. федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН

Папин Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный университет», кафедра дифференциальных уравнений, заведующий кафедрой

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «28» февраля 2014 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46 (тел/факс (3852) 29 87 22; E-mail: D21200403@mail.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «25» декабря 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



С.П. Кулманаков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. По данным федеральной службы государственной статистики Российской Федерации в последние годы наблюдается постоянный рост производства пластических масс, химических нитей и волокон, синтетического каучука и других полимерных материалов. Данный рост соответствует изменениям в различных областях. Например, в машиностроении (автостроение, авиастроение, судостроение и др.) возрастает с каждым годом спрос на детали из конструкционных полимерных материалов. Активно развивается строительная индустрия и жилищно-коммунальный сектор. В этих отраслях используется большое количество изделий из полимерных материалов. В отчете «Стратегия развития химической и нефтехимической промышленности РФ на период до 2015 года», разработанной в соответствии с поручением правительства РФ от 19.01.2005 г., указывается на огромные перспективы для предприятий производящих полимерные материалы и дается прогноз на двукратное увеличение производства данных материалов к 2015 году (в сравнении с 2006 годом).

Полимерные материалы являются только сырьем. Это сырье еще необходимо переработать, чтобы получить готовое изделие. В настоящее время существует множество технологий переработки полимеров. Наиболее популярным является метод, при котором материал переводится в текущее состояние, и затем раствору или расплаву придается требуемая форма с последующим затвердеванием в форме изготавливаемого изделия. Технологические процессы получения полимерных изделий постоянно совершенствуются. Поэтому закономерности движения и теплообмена таких материалов представляют не только теоретический интерес, но и большое практическое значение. Но поведение полимерных материалов отличается от поведения жидкостей и твердых тел. В силу особенностей строения полимеры обладают рядом уникальных свойств: способность к высоким обратимым деформациям, способность макромолекул к ориентации под действием направленного механического поля. Поэтому для описания течений полимерных жидкостей, возникающих при производстве различных изделий, необходимо построение реологического определяющего соотношения. Это можно осуществить с помощью феноменологического или статистического (микроструктурного) подхода. На данный момент наилучшие результаты дает микроструктурный подход, в основе которого лежит обобщенная реологическая модель Виноградова-Покровского. Достигнутые результаты позволяют рассматривать более сложные течения и применять к расчетам некоторых технологических процессов.

Цель диссертационной работы.

Обоснование реологического определяющего соотношения расплавов полимеров для описания их неоднородных течений в неизотермическом случае на примере получения математической модели процесса формования полимерных пленок.

Для достижения поставленных целей требуется решить **следующие задачи:**

1. Обоснование выбора реологической модели, используемой для описания течений растворов и расплавов линейных полимеров.
2. Разработка математической модели процесса формирования полимерных пленок при учете теплопереноса и обоснование возможности использования одномерного приближения при моделировании процесса формирования полимерных пленок в режимах однородного и двухосного растяжений.
3. Решение задачи об определении положения свободной кромки полимерной пленки в режиме двухосного растяжения.
4. Алгоритмическая реализация процесса решения полученных систем дифференциальных уравнений, исследование влияния параметров модели на вид получаемых зависимостей и проверка адекватности полученной математической модели путем сравнения с имеющимися экспериментальными данными.
5. Определение значений параметра анизотропии потока для линейных полимеров по зависимостям полуширины пленки.

Объектом исследования являются реальные течения полимерных сред в узлах технологического оборудования.

Предметом исследования является математическая модель процесса формирования полимерных пленок на основе обобщенной реологической модели Виноградова-Покровского с учетом теплопереноса.

Методы исследования

Реологическая модель, описывающая поведение исследуемого течения, была получена в рамках микроструктурного подхода. Для решения и анализа полученной системы дифференциальных уравнений использовался метод конечных элементов. Моделирование процесса формирования полимерной пленки осуществлялось в одномерном приближении, причем при описании кинематики процесса учитывалось её двухосное растяжение.

Научную новизну представляют следующие **положения, выносимые на защиту:**

1. Система уравнений динамики в одномерном приближении, при учете теплопереноса, когда продольная скорость, скорость удлинения, температура, ненулевые компоненты тензора напряжений являются функциями только продольной координаты, а реологические параметры модели являются известными функциями температуры.
2. Математическая модель и результаты численного исследования системы обыкновенных дифференциальных уравнений для зависимости ширины и толщины пленки от её продольной скорости в случае анизотропного одноосного растяжения.
3. Закономерности влияния параметров модели на вид получаемых зависимостей продольной скорости, температуры, ненулевых компонент тензора напряжений от расстояния до выхода из экструдера и необходимость

учета параметра анизотропии потока при моделировании процесса формирования полимерной пленки в одномерном приближении.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая ценность работы заключается в развитии методологии математического моделирования процессов течений полимерных сред.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в возможности использования полученной модели на производстве для оптимизации процессов получения пленки из расплавов.

Полученные результаты могут использоваться в учебном процессе при организации специальных курсов для аспирантов и студентов.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обеспечивается корректностью постановок задач, использованием апробированных вычислительных методов и реологических моделей.

Для построения и обоснования реологических соотношений в диссертации применяется подход, который основывается на известных представлениях о поведении полимеров на молекулярном уровне, использует модели, которые учитывают строение полимера. Поэтому в рамках сделанных допущений и предположений это определяет адекватность полученных соотношений реальным полимерам.

Результаты, которые были получены в работе, сводятся, при упрощении, к известным результатам, используемых в теоретических и экспериментальных исследованиях полимерных пленок. Результаты расчетов для исследуемого технологического процесса качественно согласуются с известными экспериментальными данными.

Реализация результатов работы. Материалы диссертации используются в ООО «Полимер-Декор» (г. Заринск), в АлтГТУ им. И.И. Ползунова в учебном процессе.

Апробация работы. Основные теоретические и практические результаты работы представлены автором на следующих научных конференциях, семинарах и научных школах: всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 50 летию Бийского технологического института «Инновационные технологии: производство, экономика, образование» (Бийск, 24 сентября, 2009 г.); Annual European Rheology Conference «AERC-2010» (Швеция, 7-9 апреля 2010 г.); межрегиональная научно-практическая конференция «Научный потенциал молодежи – будущему России» (Волгодонск, 23 апреля 2010 г.); VII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и Молодежь – 2010» (Барнаул, 23 апреля, 2010 г.); пятая всероссийская каргинская конференция «Полимеры — 2010» (Москва, 21-25 июня, 2010 г.); Proceedings of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting «PPS-26» (Канада, 4-8 июля 2010 г.); 25 симпозиум по реологии (Осташков, 5-10 сентября, 2010 г.); международная научно-практическая конференция «Математическое образование в регионах России» (Барнаул, 22 октября 2010 г.); международная

школа-семинар «Ломоносовские чтения на Алтае» (Барнаул, 4-8 октября 2010 г.); всероссийская конференция молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах» (Пермь, 26-27 ноября 2010 г.); III конференция молодых ученых «Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем» (Суздаль, 10-15 мая, 2011 г.); Annual Meeting Polymer Processing Society «PPS-27» (Марокко, 10-14 мая, 2011 г.); четырнадцатая региональная конференция по математике «МАК-2011» (Барнаул, 24 июня, 2011 г.); международная научная конференция «Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование» (Волгодонск, 4-5 июля, 2011 г.); международная школа-семинар «Ломоносовские чтения на Алтае» (Барнаул, 8-11 ноября, 2011 г.); X Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и Молодежь – 2013» (Барнаул, 26 апреля, 2013 г.); шестнадцатая региональная конференция по математике «МАК-2013» (Барнаул, 28 июня, 2013 г.), V всероссийская научная конференция (с международным участием) «Физикохимия процессов переработки полимеров» (Иваново, 16-19 сентября 2013 г.).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 12-01-00033, 09-01-00293) и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007- 2013 годы» ГК № 07.514.12.4034.

Публикации. По теме диссертационной работы автором опубликовано 25 работ, в том числе 3 статьи в ведущих реферируемых научных журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных работ, свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения. Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 26 рисунков, 1 таблицу, список литературы состоит из 123 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, сформулированы цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований, представленных в диссертации. Описывается структура и содержание диссертации.

В первой главе проведен анализ научно-технической литературы, посвященной уравнениям состояния в механике сплошных сред.

Приведена общая характеристика подходов для описания сплошных сред. Сформулировано реологическое уравнение состояния, которое устанавливает в общем случае нелинейную вязкоупругую жидкость с точностью до неизвестных функций. Дальнейшая конкретизация записанных выражений возможна на основе информации о структуре исследуемого материала. В случае описания жидкостей, которые содержат гибкоцепные линейные полимеры, при микроструктурном подходе, можно использовать представления о динамике полимерных макромолекул. Достоинства и недостатки данного

подхода целиком определяются моделью, которая была выбрана, чтобы описать движение макромолекулы.

На сегодняшний день существует множество различных способов моделирования динамики макромолекул. Модель Флори является одной из наиболее подробных. Данная модель при описании равновесных свойств полимерной молекулы учитывает такие характеристики как длины химических связей, углы между связями и вращательные изомерные состояния.

Согласно модели Крамерса полимерная цепь представляет собой набор точечных масс, которые линейно соединены системой жестких стержней. Данная цепь является свободно сочлененной.

Модель Кирквуда-Райзмана похожа на модель Крамерса – соединение частиц цепи происходит посредством стержней. Однако, данная модель определяет положение каждой последующей связи – она должна лежать на поверхности конуса с заданным углом раствора.

Большое распространение получила модель в виде упругой гантели – две «бусинки» соединяются упругой силой – «пружинкой». С использованием данной модели проводятся аналитические исследования достаточно сложных эффектов. Реологические определяющие соотношения, которые были сформулированы на ее основе, показывают хорошие практические результаты. Поэтому в современных исследованиях можно встретить использование данной модели. Модель Каргина-Слонимского-Рауза представляет собой обобщение этой модели для случая большого количества «бусинок».

Вторая глава посвящена изучению динамики линейных макромолекул в одномолекулярном приближении.

Цепочки связанных броуновских частиц эффективно представляют макромолекулу. При этом макромолекула состоит из N субцепей. Длина каждой субцепи равна M/N . В этом случае, движение линейной цепочки из $N+1$ броуновской частицы, которые связаны между собой упругими силами, описывает поведение макромолекулы.

Пренебрегая взаимным гидродинамическим взаимодействием частиц в линейном по скоростям приближении, динамика единичной цепочки может быть описана набором стохастических уравнений, удовлетворяющих второму закону динамики. В полученных уравнениях учитываются сила упругости пружины между соседними частицами, эффективные силы соседних макромолекул (сила гидродинамического увлечения и сила внутренней вязкости), случайная сила, сила трения в «мономерной» жидкости.

Для решения уравнений использовался метод Рунге-Кутты 4 порядка. В результате были получены значения величин смещения центра масс макромолекулы.

При этом наличие плато на зависимости смещения центра масс макромолекулы от времени обнаруживает существование в теории характерного масштаба, который можно интерпретировать как диаметр «трубки» в рептационной теории Д'Жена. Это указывает на наличие

диффузного механизма движения макромолекулы, правомерность введения в рассмотрение времен релаксации τ_v , и не противоречит известным теоретическим и экспериментальным данным

В третьей главе было рассмотрено течение полимерной жидкости в одномерном приближении соответствующее процессу формирования полимерной пленки, который представляет собой продавливание полимерного расплава через экструдер (рисунок 1). После выхода из экструдера, полученная пленка попадает на охлаждающий барабан. В результате движения пленки от экструдера до барабана происходит её охлаждение, изменение ширины и толщины. При этом пленка растягивается неравномерно, что приводит к появлению «эффекта шейки», заключающегося в существовании двух участков на зависимости ширины пленки от расстояния до выхода из экструдера. На первом участке происходит существенное изменение ширины пленки за счет интенсивного деформирования, в отличие от второго участка, на котором это изменение незначительно и материал движется как единое целое. Так как все эти процессы происходят одновременно, то при их математическом моделировании необходимо совместное решение уравнений для скоростей, напряжений и теплопереноса.

Обобщенная реологическая модель Виноградова-Покровского использовалась для нахождения установившихся напряжений при растяжении (параметры этой модели являются известными функциями температуры)

$$\sigma_{ik} = -p\delta_{ik} + 3\frac{\eta_0}{\tau_0}a_{ik};$$

$$\frac{d}{dt}a_{ik} - v_{ij}a_{jk} - v_{kj}a_{ji} + \frac{1+(\kappa-\beta)I}{\tau_0}a_{ik} = \frac{2}{3}\gamma_{ik} - 3\frac{\beta}{\tau_0}a_{ij}a_{jk},$$
(1)

где σ_{ik} – тензор напряжений; p – гидростатическое давление; δ_{ik} – символ Кронекера; η_0 и τ_0 – начальные значения сдвиговой динамической вязкости и времени релаксации; v_{ik} – тензор градиентов скорости; a_{ik} – симметричный тензор анизотропии второго ранга; $I=a_{jj}$ – первый инвариант тензора анизотропии; $\gamma_{ik} = \frac{1}{2}(v_{ik} + v_{ki})$ – симметризованный тензор градиентов скорости; κ, β – феноменологические параметры модели, учитывающие в уравнениях динамики макромолекулы размеры и форму молекулярного клубка; t – время.

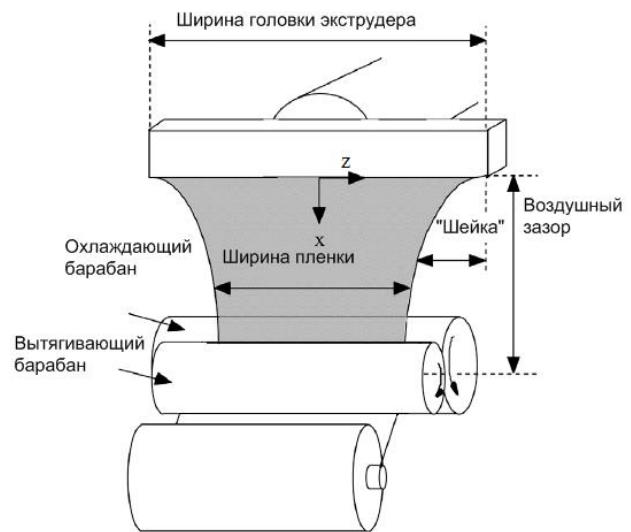


Рисунок 1 - Схематичное изображение технологического процесса изготовления полимерной пленки

Была показана возможность использования модифицированной реологической модели Виноградова-Покровского для описания течений расплавов линейных полимеров в различных режимах деформирования.

Система уравнений динамики записана в одномерном приближении, с учетом теплопереноса, когда продольная скорость, температура, скорость удлинения, ненулевые компоненты тензора напряжений являются функциями только продольной координаты, а параметры реологической модели являются известными функциями температуры.

Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений для зависимости полуширины и толщины пленки от ее продольной скорости в случае двусосного растяжения:

$$\begin{aligned}
 \rho u \frac{du}{dx} &= 3 \frac{d}{dx} \left(\frac{\eta_0}{\tau_0} (a_{11} - a_{33}) \right) \\
 u \frac{da_{11}}{dx} - 2 \frac{du}{dx} a_{11} + \frac{1 + (\kappa - \beta)(a_{11} + a_{22} + a_{33})}{\tau_0} a_{11} &= \frac{2du}{3dx} - \frac{3\beta a_{11}^2}{\tau_0} \\
 u \frac{da_{22}}{dx} + (1 - \alpha) \frac{du}{dx} a_{22} + \frac{1 + (\kappa - \beta)(a_{11} + a_{22} + a_{33})}{\tau_0} a_{22} &= -\frac{1 - \alpha}{3} \frac{du}{dx} - \frac{3\beta a_{22}^2}{\tau_0} \\
 u \frac{da_{33}}{dx} + (1 + \alpha) \frac{du}{dx} a_{33} + \frac{1 + (\kappa - \beta)(a_{11} + a_{22} + a_{33})}{\tau_0} a_{33} &= -\frac{1 + \alpha}{3} \frac{du}{dx} - \frac{3\beta a_{33}^2}{\tau_0} \\
 \rho c_v u \frac{dT}{dx} &= \lambda \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{\mu}{h} (T - T_0),
 \end{aligned} \tag{2}$$

где c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме, T – температура пленки, T_0 – температура окружающей среды, λ – коэффициент теплопроводности, μ – коэффициент теплообмена, $h = \frac{S}{p}$ – отношение площади сечения пленки к периметру сечения, $u(x)$ – скорость пленки, α – параметр анизотропии потока.

Получено выражение для ширины (a) и толщины (b) пленки:

$$a(x) = a(0) \left(\frac{u(x)}{v_0} \right)^{\frac{1-\alpha}{2}}, \quad b(x) = b(0) \left(\frac{u(x)}{v_0} \right)^{\frac{1+\alpha}{2}}.$$

Система уравнений (2) представляет собой совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, четыре из которых первого порядка и одно второго. Поэтому она должна быть дополнена шестью граничными условиями. Четыре из них можно поставить достаточно просто. В случае v_x эти условия имеют вид: $v_x(0) = v_0$; $v_x(l) = kv_0$, где k – коэффициент растяжения пленки.

В эксперименте, температура пленки в месте соприкосновения с барабаном совпадает. Температура барабана равна температуре окружающей среды. Тогда граничные условия для температуры примут вид: $T(0) = T_1$; $T(l) = T_0$, где T_1 – температура расплава на выходе из экструдера. Два дополнительных

условия для напряжений получены при расчете движения полимерной жидкости в головке экструдера.

При проведении расчетов по модели (2) будем считать, что

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_1) e^{\frac{\Delta H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)}, \quad \tau_0(T) = \frac{\eta_0(T)}{nkT},$$

где n – число макромолекул в единице объема, k – константа Больцмана, R – универсальная газовая постоянная, ΔH – энергия активации.

Было осуществлено обезразмеривание задачи. Все уравнения системы, граничные условия и т.д. были приведены к безразмерному виду, что предоставило возможность ввести в рассмотрение безразмерные числа:

Прандтля ($Pr = \frac{\eta_0^* c_v}{\lambda}$), Нуссельта ($Nu = \frac{\mu \cdot l}{\lambda}$), Рейнольдса ($Re = \frac{\rho V_0 l}{\eta_0^*}$) и

Вайсенберга ($We = \frac{\tau_0^* V_0}{l}$) – параметры модели.

В результате преобразованная система была решена и исследовано влияние параметров на полуширину пленки и ее скорость.

При росте значения параметра Re происходит более медленное остывание пленки, что приводит к более пологому выходу ширины пленки на постоянное значение.

Аналогичную зависимость можно наблюдать и при увеличении числа Прандтля Pr . В этом случае теплообмен с окружением уменьшается, влияние охлаждающего барабана сказывается меньше, что приводит к меньшему остыванию пленки.

Увеличение числа Nu приводит к более крутому уменьшению полуширины пленки, что объясняется ее более быстрым остыванием за счет отдачи тепла в окружающий воздух. В случае уменьшения параметра Nu наблюдается уменьшение времени остывания пленки.

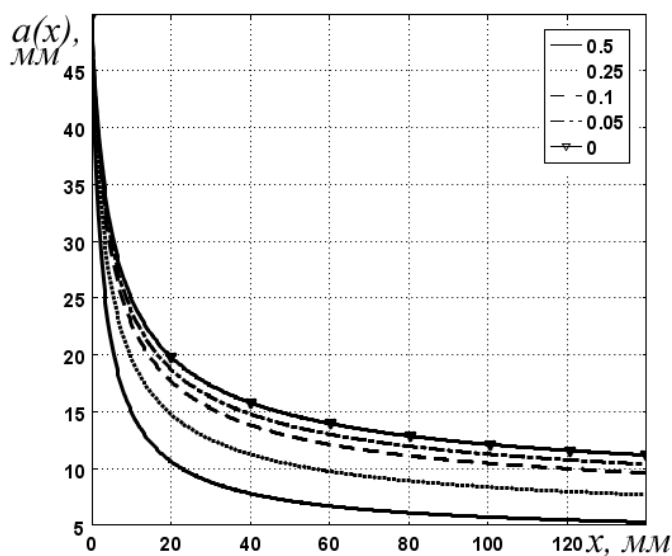


Рисунок 2 - Полуширина пленки при различных α

Наблюдается обратная зависимость температуры от значений параметров Pr и Re соответственно: при их увеличении пленка остывает быстрее.

Стоит обратить внимание, что изменение параметра анизотропии растяжения потока производит наибольшее воздействие на полуширину пленки (рисунок 2). При этом меньшие значения этого параметра соответствуют большей ширине пленки.

Полученные теоретические

зависимости сравнивались с экспериментальными данными из работы C.W.Seay и D.G.Baird «Sparse Long-chain Branching's Effect on the Film-casting Behavior of PE» (журнал International Polymer Processing, 2009, №5), где было исследовано течение расплава между экструдером и барабаном для различных образцов полиэтилена. Опыт проводился при следующих значения параметров $l = 0,14$ м, $b_0 = 0,0005$ м, $a_0 = 0,051$ м, $v_0 = 0,00082$ м/с. На основе этих значений и коэффициентов теплопроводности и теплоемкости образцов были рассчитаны безразмерные числа Re, Pr, We, значения которых приведены в таблице 1. Параметр α подбирался из условия наилучшего совпадения расчетных и экспериментальных данных. Число Нуссельта вычисляли по формуле $Nu = 0,55(Al^3t)^{0,25}$, где A является модулем конвекции и его величина для образцов равна $36 \cdot 10^6$ (м³С)⁻¹, t – температура в °С.

Таблица 1

Полимер	η_0 , T=423 К, Па·с	$\Delta H/R$, К	nk, Дж/м ³ К	ρ , кг/м ³	α	Pr·10 ⁷	Re·10 ⁻⁵	We·10 ⁻³
Exxon Exact3132	15326	4101,1	67,3	900	0,07	1,53	4,8	3,17
Mobil NTX101	17813	3362,8	62,1	917	0,15	1,78	4,2	3,9
Dow Affinity PL1880	33084	4530,5	64,7	902	0,2	3,3	2,2	7
Dow Affinity PL1840	33480	4654,6	86,4	909	0,3	3,35	2,2	5,4

Проведено сравнение с имеющимися в литературе экспериментальными данными по замерам полуширины различных образцов полимерной пленки. Результаты расчетов приведены на графиках (рисунки 3-6), где видно удовлетворительное соответствие теоретических кривых и значений, полученных в ходе эксперимента.

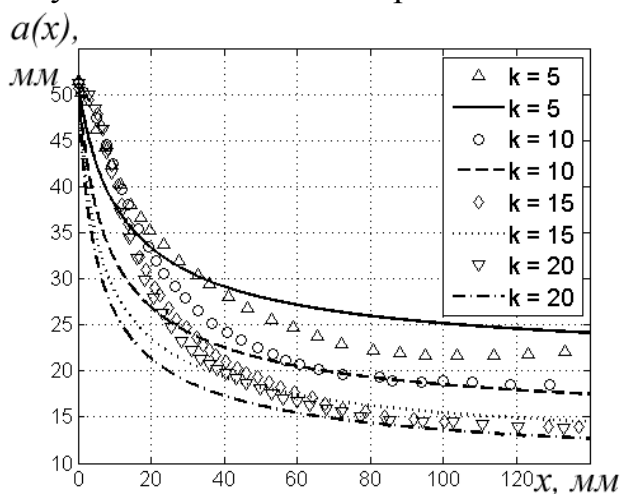


Рисунок 3 - Сравнение теоретических (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей полуширины пленки от расстояния до головки экструдера при различных степенях растяжения (образец 1)

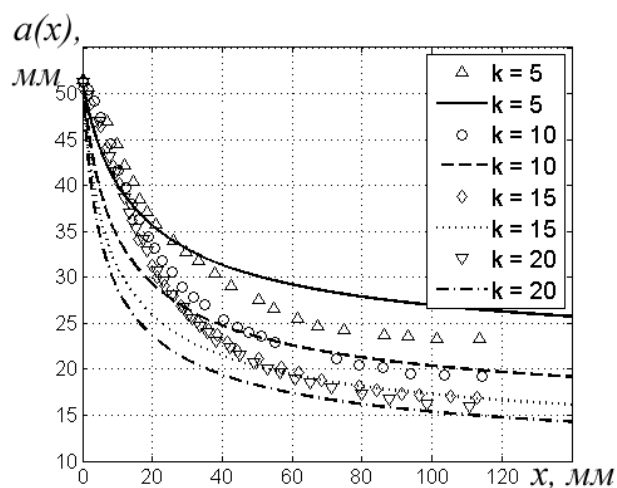


Рисунок 4 - Сравнение теоретических (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей полуширины пленки от расстояния до головки экструдера при различных степенях растяжения (образец 2)

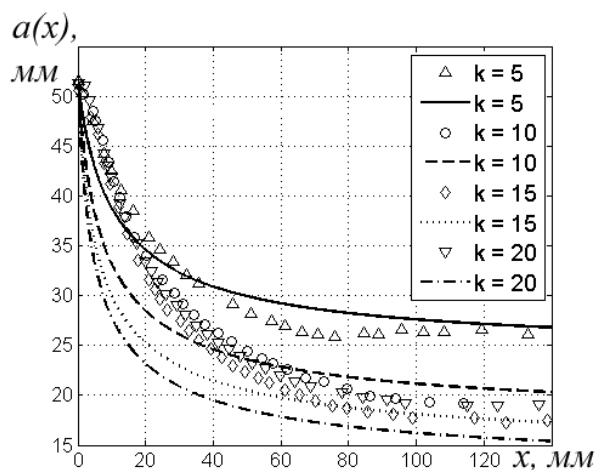


Рисунок 5 - Сравнение теоретических (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей полуширины пленки от расстояния до головки экструдера при различных степенях растяжения (образец 3)

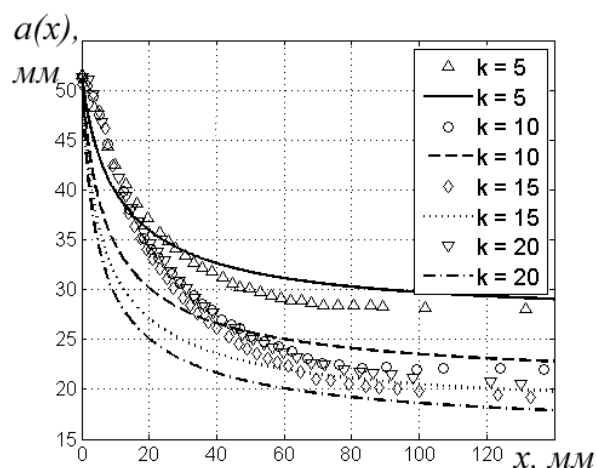


Рисунок 6 - Сравнение теоретических (линии) и экспериментальных (точки) зависимостей полуширины пленки от расстояния до головки экструдера при различных степенях растяжения (образец 4)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

1. Показана возможность использования модифицированной реологической модели Виноградова-Покровского для описания течений расплавов линейных полимеров в различных режимах деформирования.

2. Получена система уравнений динамики, которая записана в одномерном приближении, при учете теплопереноса, когда продольная скорость, скорость удлинения, температура, ненулевые компоненты тензора напряжений являются функциями только продольной координаты, а реологические параметры модели являются известными функциями температуры.

3. Установлена зависимость ширины и толщины пленки от ее продольной скорости, что позволило применить одномерное приближение при получении модели формования полимерной пленки из расплава полимера.

4. Исследовано влияние параметров модели (начальной сдвиговой вязкости, начального времени релаксации, коэффициента температуропроводности, коэффициента теплообмена, коэффициенты наведенной анизотропии и коэффициента анизотропии потока) на вид получаемых зависимостей продольной скорости, температуры, ненулевых компонент тензора напряжений от расстояния до выхода из экструдера:

– установлено, что при больших значениях Re ($Re = 0,001$; $Re = 5 \cdot 10^{-4}$; $Re = 5 \cdot 10^{-5}$) образец не успевает остыть до температуры охлаждающего барабана. При $Re = 5 \cdot 10^{-6}$ образец практически полностью остывает, проходя только 30% расстояния между головкой экструдера и охлаждающим барабаном. При $Re = 5 \cdot 10^{-3}$ наблюдается неравномерность в растяжении. При увеличении числа Re в 200 раз изменение полуширины пленки в области интенсивного растяжения может достигать 30%;

– при $Pr > 10^5$ теплообмен с окружением уменьшается, влияние охлаждающего барабана сказывается меньше, что приводит к меньшему остыванию пленки. При больших значениях числа Pr теплообмен с окружением затруднен и температура образца при выходе из экструдера практически не изменяется за время движения пленки от головки экструдера до охлаждающего барабана. Если теплопередача не затруднена (при $Pr = 10^6$) то появляется участок с интенсивным остыванием. В случае уменьшении числа Pr в 100 раз изменение полуширины пленки в области интенсивного растяжения достигает 25%;

– в случае уменьшения параметра Nu от 20 до 0,1 наблюдается уменьшение времени остывания пленки. С ростом числа Nu происходит более быстрый выход температуры на стационарное значение. При увеличении числа Nu в 200 раз изменение полуширины пленки в области интенсивного растяжения может достигать 20%;

– изменение числа We в интервале 0.001 - 0.1 не оказывало значительного влияния на полуширину пленки.

5. Показана необходимость учета анизотропии потока при моделировании процесса формования полимерных пленок в одномерном приближении. Вычислено значение параметра анизотропии потока для полимерных пленок участвующих в эксперименте: для Exxon Exact3132 $\alpha = 0,07$; для Mobil NTX101 $\alpha = 0,15$; для Dow Affinity PL1880 $\alpha = 0,2$; для Dow Affinity PL1840 $\alpha = 0,3$.

Результаты расчетов показали удовлетворительное соответствие теоретических и имеющихся в литературе экспериментальных данных по замерам полуширины различных образцов полимерной пленки, что говорит об адекватности полученной модели, описывающей процесс формования полимерных пленок в условиях двухосного растяжения с учетом теплопереноса.

На основе данной модели предложена методика инженерного расчета процесса формования полимерной пленки из расплава, которая предназначена для использования на этапе входного контроля качества сырья. Результаты работы используются в ООО «Полимер-Декор» (г.Заринск).

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные автором в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

1. **Третьяков И.В.** К обоснованию рептационного механизма диффузии линейной макромолекулы в теории микровязкоупругости / И.В. Третьяков, Ю.Б. Трегубова, Ю.А. Алтухов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – Барнаул: АлтГТУ, 2011. – Т. 8. - №4. – С. 27-31. 0,31 п.л. (лично автора – 0,1 п.л.)

2. **Третьяков И.В.** Математическое моделирование процесса формования полимерных пленок в условиях двуосного растяжения с учетом

теплопереноса / И.В. Третьяков, Г.В. Пышнограй, Ю.А. Алтухов // Прикладная механика и техническая физика: научн. журн. / Гл. ред. В.К. Кедринский. – Новосибирск: изд-во сибирского отделения РАН, 2012. – №2. – С. 84-90. 0,37 п.л. (лично автора – 0,12 п.л.)

3. **Третьяков И.В.** Постановка мезоскопических граничных условий для скорости проскальзывания на границе / Макарова М.А., Г.В. Пышнограй, И.В. Третьяков и др. // Ползуновский вестник. – Барнаул: АлтГТУ, 2012. – № 3/1. – С. 61-74. 0,85 п.л. (лично автора – 0,1 п.л.)

Другие публикации:

4. **Третьяков И.В.** К теории формирования полимерных пленок [Электронный ресурс] / И.В. Третьяков, А.А. Рыбаков, Г. В. Пышнограй // Электронный Физико-Технический Журнал – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – Т.5. – С. 7-14 - Режим доступа: <http://eftj.secna.ru/vol5/100502.pdf> . 0,5 п.л. (лично автора – 0,016 п.л.)

5. **Tretjakov I.** The statistical mechanics of suspension nonlinear dumbbells and modeling of process of polymer film casting on its basis / I. Pyshnograd, I. Tretijakov, G. Afonin, G. Pyshnograd // Book of abstracts of Annual European Rheology Conference «AERC 2010». – P. 123. 0,06 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)

6. **Третьяков И.В.** Мезоскопический подход в механике растворов и расплавов линейных полимеров и описание некоторых одномерных течений / И.В. Третьяков, Г.Л. Афонин, Г.В. Пышнограй // Научный потенциал молодёжи – будущему России : материалы и доклады межрегиональной научно-практической конференции / Волгодонский ин-т сервиса (филиал). – Шахты: ЮРГУЭС, 2010. – С. 26. 0,6 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)

7. **Третьяков И.В.** Статистическая механика суспензии нелинейных релаксаторов и моделирование процесса двухосного растяжения и охлаждения полимерных пленок на его основе / Г.В. Пышнограй, И.Г. Пышнограй, И.В. Третьяков, Г.Л. Афонин // Сборник тезисов пятой всероссийской Каргинской конференции «Полимеры-2010». – М: Издательство МГУ, 2010. – С. 211. 0,06 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)

8. **Tretijakov I.** The mesoscopic constitutive equations for polymeric fluids and some examples of flows / A. Gusev, G. Afonin, I. Tretijakov, G. Pyshnograd // Book of abstracts of Proceeding of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting (PPS-26). – P. 12-18. 0,43 п.л. (лично автора – 0,1 п.л.)

9. **Третьяков И.В.** Многомодальное приближение в структурно кинетической теории текучих полимерных сред [Электронный ресурс] / И.В. Третьяков, И.Г. Пышнограй, Г.В. Пышнограй, Г.Л. Афонин // Программа и материалы международной конференции "25 симпозиум по реологии" / ИНХС РАН, 2010. – С. 53. - Режим доступа: <http://www.ips.ac.ru/rheo/seliger2010.pdf>. 0,06 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)

10. **Третьяков И.В.** Кинетическая теория текучих полимерных сред / И.В. Третьяков, Г.В. Пышнограй, Г.Л. Афонин // Сборник научных статей международной школы-семинара «Ломоносовские чтения на Алтае». – Барнаул: АлтГПА, 2010. – С. 237-241. 0,31 п.л. (лично автора – 0,1 п.л.)

11. **Третьяков И.В.** Реологическое поведение полимерного расплава в модели Виноградова-Покровского с учетом теплопереноса // И.В. Третьяков, Г.Л. Афонин, Х. Надом, И.Г. Пышнограй // Тезисы докладов всероссийской конференции молодых ученых «Неравновесные процессы в сплошных средах». – Пермь: Изд-во ПГУ, 2010. – С.88. 0,06 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)
12. **Третьяков И.В.** Некоторые решения системы уравнений динамики полимерных сред в одномерном приближении / Г.Л. Афонин, И.В. Третьяков, Г.В. Пышнограй, И.Г. Пышнограй, Ю.А. Алтухов, Х. Надом // Материалы международной III конференции молодых ученых «Реология и физико-химическая механика гетерофазных систем. – С. 93. 0,06 п.л. (лично автора – 0,01 п.л.)
13. **Tretyakov I.** Constitutive equation for polymeric fluids and some one dimensional cases of flows / I. Tretyakov, H. Nadhom, G. Pyshnograï, I. Pyshnograï, G. Afonin // Book of abstracts of Annual European Rheology Conference «AERC 2011». – P. 61. 0,06 п.л. (лично автора – 0,01 п.л.)
14. **Tretyakov I.** Mesoscopic rheological model for polymeric fluids and some examples of flows / G. Afonin, I. Tretyakov, H. Nadhom, I. Pyshnograï // Book of abstracts of Proceeding of the Polymer Processing Society 26th Annual Meeting (PPS-26). – P. 274. 0,06 п.л. (лично автора – 0,015 п.л.)
15. **Третьяков И.В.** Математическое моделирование процесса формирования полимерных пленок в условиях двуосного растяжения с учетом теплопереноса // Теория операторов, комплексный анализ и математическое моделирование: тезисы докладов международной научной конференции. — Владикавказ: ЮМИ ВНЦ РАН и PCO-A, 2011. – С. 175 – 176. 0,12 п.л.
16. **Tretjakov I.** The Mesoscopic Constitutive Equation for Polymeric Fluids and Some Examples of Flows / G. Afonin, I. Tretjakov, G. Pyshnograï, A. Gusev // Viscoelasticity: theories, types and models / editors, Jennifer N. Perkins and Tyler M. Lach. – New York: Nova Science Pub Inc., 2011. – Ch. 10. – P. 187-203. 1,06 п.л. (лично автора – 0,26 п.л.)
17. **Третьяков И.В.** Зависимость характеристик процесса формирования полимерных пленок от параметров тепло и массопереноса [Электронный ресурс] / И.В. Третьяков, И.Г. Пышнограй, Ю.Б. Трегубова // Наука и молодежь – 2013 X: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Барнаул: АлтГТУ, 2013. – С. 96-97. - Режим доступа: <http://edu.secna.ru/media/f/povt2013.pdf>. 0,06 п.л. (лично автора – 0,02 п.л.)
18. **Третьяков И.В.** Зависимость характеристик процесса формирования полимерных пленок о параметров тепло- и массопереноса / И.В. Третьяков, Ю.Б. Трегубова, Г.В. Пышнограй // Материалы шестнадцатой региональной конференции по математике «МАК-2013». – Барнаул: Изд-во Алт. Ун-та, 2013. – С. 62-65. 0,19 п.л. (лично автора – 0,06)
19. **Третьяков И.В.** Влияние параметров тепло- и массопереноса на характеристики процесса формирования полимерных пленок / И.В. Третьяков, Ю.Б. Трегубова, Г.В. Пышнограй // Материалы V всероссийской научной конференции (с международным участием) «Физикохимия процессов

переработки полимеров». – Иваново: ОАО «Издательство «Иваново», 2013.- С. 28. 0,06 п.л. (лично автора – 0,02 п.л.)

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ:

20. **Третьяков И.В.** Программа гидродинамического моделирования течения сплошной среды на основе мезоскопического подхода в каналах с заданной микрогеометрией поверхности стенок / И.В. Третьяков, Ю.Б. Трегубова, Г.В. Пышнограй, Ю.А. Алтухов, К.Б. Кошелев // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614418. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ Федеральной службы по интеллектуальной собственности от 07 мая 2013 г.