

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям  
федерального государственного  
бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет»



доктор технических наук, профессор  
В. Н. Коротаев  
«19» февраля 2020 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет»  
на диссертацию Черпаковой Надежды Анатольевны  
«Нелинейное поведение концентрированных растворов полимеров при  
больших периодических деформациях»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

#### **Актуальность темы диссертации**

В настоящее время полимеры являются одними из самых популярных материалов, используемых во многих сферах жизни. Их многообразие и повсеместное применение приводит к необходимости детального исследования их свойств с целью расширения технологических возможностей применения материалов. Математическое моделирование является одним из популярных инструментов для исследования свойств полимерных материалов в различных режимах деформирования, большое количество достаточно точных математических моделей позволяет описывать свойства полимеров и прогнозировать их поведение в областях, где экспериментальные исследования не дают достоверных результатов. Вместе с тем, экспериментальные методы достигли большого прогресса в измерении и описании сложных вискозиметрических течений, что позволило продолжить развивать теоретические методы описания этих течений. Наличие мощных математических пакетов позволяет быстрее получать более точные результаты

решения задач, основанных на математических моделях. В рамках современных представлений поведение вязкоупругой жидкости на макроуровне зависит главным образом от структуры и реализации механизмов деформирования на низших масштабных уровнях; в частности, макроскопическое разрушение является следствием накопления необратимой деформации и разрушения структуры образца. Вследствие этого существенный интерес представляет разработка математических моделей, учитывающих влияние на свойства напряженно-деформированного состояния релаксационных процессов, протекающих на разных масштабных и структурных уровнях. При этом сами процессы часто носят существенно нелинейный характер. В связи с этим представленная диссертация, посвященная разработке математической модели для нелинейного поведения растворов полимеров в режиме больших периодических деформаций, отвечает современным потребностям механики сплошной среды и является актуальной.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, содержащего 96 наименований, и приложения. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, включая 41 рисунок и 2 таблицы. Во введении обоснована актуальность темы, новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, определены методы исследования, обоснована достоверность результатов и выводов, приведены сведения об апробации и публикации результатов работы и о личном вкладе автора, в реферативной форме изложено содержание разделов диссертации.

Первая глава содержит обзор экспериментальных и теоретических методов исследований в области реологии. В качестве которых описаны метод малоамплитудного динамического сдвига и метод исследования свойств в режиме больших периодических деформаций. Изложены основные особенности исследования деформаций с большой амплитудой. Обсуждаются различные реологические модели, используемые для описания вискозиметрических функций при простом сдвиге и одноосном растяжении. Представленный обзор свидетельствует об достаточной осведомленности соискателя о современном состоянии проблемы в России и за рубежом.

Во второй главе представлены основные принципы формулировки определяющих реологических соотношений, в основе которых лежат законы сохранения. Система уравнений баланса массы, импульса и энергии используется для поиска пространственных распределений компонентов скорости, давления и температуры. Для замыкания этой системы добавляют реологическое уравнение состояния, которое связывает напряжения с

деформациями или скоростями деформации. Формулировка определяющих уравнений является центральной проблемой реологии. Рассмотрены основные принципы формулировки данных уравнений, такие как принцип материальной объективности, принцип инвариантности, принцип детерминизма. Подробно рассматривается вывод реологического определяющего соотношения для описания динамики суспензии нелинейных невзаимодействующих гантелей, в процессе которого был использован микроструктурный подход. При выводе были использованы: модель Каргина–Слонимского–Рауза, закон трения Стокса, в результате чего было получено определяющее реологическое соотношение для нелинейной анизотропной вязкоупругой жидкости с параметрами, которые зависят от молекулярной массы образца и его концентрации. Показано качественное соответствие полученного соотношения реальным течениям полимерных материалов.

Третья глава посвящена исследованию свойств многомодовой модификации ранее полученного соотношения и особенностям численного решения задач, возникающих при моделировании вискозиметрических течений. Системы дифференциальных уравнений, полученные при моделировании простого сдвига и одноосного растяжения были решены численно методом Рунге-Кутты. Стоит отметить, что проверка решений тремя различными методами исключает возможность ошибки при численном решении. По результатам сравнения с экспериментальными данными в работе сделан вывод, что при модификации на многомодовый случай была решена проблема количественного несоответствия модели реальным течениям полимерных растворов и расплавов. Большое внимание уделено рассмотрению метода малоамплитудного динамического сдвига, установлена связь между частотой деформирования и компонентами динамического модуля. Выведенные в этом случае аналитические зависимости фазовых траекторий в координатах напряжение деформация и напряжение скорость деформации позволяют более наглядно проследить эту связь. Это позволило автору сделать вывод о том, что важность построения фазовых траекторий наиболее актуальна, когда компоненты динамического модуля теряют свой физический смысл, при увеличении амплитуды деформирования. Сравнение расчетов с экспериментальными данными частотных зависимостей компонент динамического модуля, и с зависимостями компонент динамического модуля от амплитуды деформирования наглядно демонстрирует необходимость отказа от исследования их при увеличении амплитуды деформирования и выборе другого способа исследования.

В четвертой главе разработанная реологическая модель применяется для моделирования поведения материалов в режиме больших периодических

деформаций. Рассмотрены и выбраны основные методы исследования поведения материалов такие как, непосредственный анализ сдвигового напряжения, исследование компонент динамического модуля и построение фигур Лиссажу и их анализ. Выполнено моделирование сдвигового напряжения при различных амплитудах деформирования и различных параметрах воздействия, выяснено влияние параметров модели на вид исследуемой зависимости. Сравнение расчетов на основе исследуемой модели с расчетами на основе модели Гизекуса, позволяют сделать вывод о качественном соответствии этих моделей. Особый интерес представляют ненулевые первая и вторая разности нормальных напряжений. Сравнение с экспериментальными данными проводится двумя методами: непосредственный анализ нормализованного сдвигового напряжения и построение фигур Лиссажу в нормированных координатах. На основании достаточно точного соответствия расчетных и экспериментальных данных делается вывод об адекватности разработанной модели.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, полученные в диссертации; результаты и выводы исследования соответствуют поставленным цели и задачам.

#### **Научная новизна исследования и полученных результатов**

- Новизна разработанной математической модели заключается в описании нелинейных эффектов в концентрированных полимерных растворах в режиме больших осциллирующих сдвиговых деформациях. При этом обнаружено увеличение несимметричности фронтов напряжения при увеличении амплитуды деформирования, а также выявлено появление «ступеньки» на одном из фронтов нелинейного отклика.

- Новизной обладает подход к верификация модифицированной реологической модели Виноградова–Покровского именно для случая моделирования течений при больших периодических деформациях.

- Новыми являются результаты численного моделирования формы осцилляций первой и второй разностей нормальных напряжений с удвоенной частотой относительно сдвигового напряжения.

#### **Научная и практическая значимость**

Полученные в диссертационной работе результаты расширяют существующие знания о влиянии реологических характеристик полимерных расплавов на их нелинейные свойства при простом сдвиге и одноосном растяжении. Разработанные модели и подходы могут быть использованы для численного анализа течений растворов и расплавов полимеров в научно-исследовательских организациях РАН и высших учебных заведениях. Значимость исследований подтверждается выполнением задач, указанных в диссертации, в рамках двух проектов Российского фонда фундаментальных

исследований (РФФИ). Также практическая значимость работы обуславливается применимостью разработанных моделей для исследования и совершенствования свойств и характеристик полимерных материалов. Еще одним подтверждением значимости этой работы является наличие комплекса программ написанного и запатентованного в процессе решения поставленных задач.

### **Достоверность и обоснованность результатов и выводов**

Достоверность результатов и выводов обосновывается корректностью математической постановки задач, использованием апробированных численных методов, исследованием решений численными методами различной точности, достаточно точным соответствием результатов расчетов экспериментальным данным, аналитическим оценкам и результатам численных исследований, полученным другими авторами.

### **Использование результатов диссертационной работы:**

Результаты, полученные в диссертации Н.А. Черпаковой, могут быть использованы в учреждениях Российской академии наук, включая: Институт Механики сплошных сред УрО РАН (г. Ижевск), Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва), Институт гидродинамики СО РАН (г. Новосибирск), Институт теоретической и прикладной механики СО РАН (г. Новосибирск); Институт нефтехимического синтеза РАН (г. Москва); в вузах Российской Федерации: МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва), СПбПУ (г. Санкт-Петербург), ННГУ им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), ПНИПУ (г. Пермь), КНИТУ-КАИ им. А.Н. Туполева (г. Казань), Алтайский государственный технический университет (г. Барнаул), НИ «Томский политехнический университет».

### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации.**

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации, в нем последовательно раскрыты поставленные цели и задачи исследования, представлены основные результаты работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Результаты и выводы в автореферате соответствуют поставленным цели и задачам исследования.

### **Подтверждения опубликованных основных научных результатов диссертации в научной печати**

Результаты диссертационного исследования опубликованы в 21 работе, в том числе 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК. Опубликованные работы отражают основное содержание диссертации. Результаты диссертации прошли апробацию на международных и всероссийских конференциях по соответствующей тематике (г. Барнаул, г. Москва, г. Пермь).

### **Замечания и вопросы по диссертации**

1. В тексте диссертационной работы имеются стилистические ошибки и опечатки (например, «Для четкого описания процессов», вместо «точного»; «от 0 до  $10^6 \text{ с}^{-1}$ » вместо « $10^6 \text{ с}^{-1}$ » (страницы 13 и 17).

2. Для проверки адекватности математической модели автором использованы экспериментальные данные только при одной частоте, что не позволяет провести верификацию полученной модели в более широком диапазоне частот. При этом сравнение производилось с нормализованными зависимостями и не приведено сравнение с фактическими значениями, хотя это бы позволило сделать вывод не только о качественном, но и о количественном соответствии модели реальным течениям полимерных материалов в исследуемом режиме.

3. Неясно, в каких случаях можно говорить о линейных эффектах, а в каких о нелинейных, что является мерилем малости градиентов скорости. В диссертации было необходимо сделать соответствующие оценки.

Перечисленные замечания не снижают общей положительной оценки диссертации Н. А. Черпаковой. Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

### **Заключение по диссертации**

Диссертация «Нелинейное поведение концентрированных растворов полимеров при больших периодических деформациях» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по достоверности, научной новизне и значимости полученных результатов полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям п.п. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 01.10.2018 г.), а ее автор, Черпакова Надежда Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». Присутствовало на заседании 19 чел. Результаты голосования: «за» - 19 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел. (протокол № 9 от 14 февраля 2020 г.).

Отзыв составил заведующий кафедрой  
«Конструирование и технологии в электротехнике»  
Пермского национального исследовательского  
политехнического университета,  
доктор технических наук, профессор



Н. М. Труфанова

Подпись Труфановой Наталии Михайловны удостоверяю:

Ученый секретарь Ученого совета ПНИПУ,  
доцент, кандидат исторических наук



В. И. Макаревич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования «Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет»

614990, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29

(3422) 19-80-67, (3422) 39-12-97; rector@pstu.ru; <http://pstu.ru>