

Отзыв

официального оппонента
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

Диссертация Н.А. Черпаковой посвящена исследованию обобщения базовой модели Виноградова–Покровского, описывающей течения растворов и расплавов несжимаемых вязкоупругих полимерных сплошных сред: во-первых, на случай полимеров высокой концентрации, когда необходимо учитывать как взаимодействия различных макромолекул (например, возможность их зацепления), так и воздействие различных частей одной макромолекулы друг на друга, так называемые "длинномасштабные" взаимодействия; во-вторых, на случай растворов разветвленных полимеров. Один из возможных вариантов такого обобщения – введение дополнительных слагаемых в тензор напряжений, отвечающих за релаксационные процессы с очень медленными временами релаксации, что, правда, приводит к необходимости "правильного" выбора набора параметров мод.

Безусловно, ценность любой реологической модели определяется тем, насколько в известном смысле близки параметры жидкости, в данном случае вязкость, первый и второй коэффициенты нормального напряжения, найденные при тестовом воздействии на среду, например при сжатии или одноосном растяжении, экспериментальным данным, которые в реальных ситуациях в качественном отношении характеризуют нелинейность процессов.

Актуальность диссертационной работы Н.А. Черпаковой определяется, в первую очередь, практической значимостью создания новых реологических моделей, дающих по возможности адекватное описание течений полимерных жидкостей в реальных условиях деформирования, когда области имеют сложную геометрию, и учитывающих нелинейные эффекты: изменение размеров вихря в углу канала, появление второго вихря у кромки на входе в узкий канал, появление периодического и непериодического поведения потока при достижении некоторой критической скорости течения (или соответствующих значений чисел Вайсенберга и Деборы).

Общая характеристика работы

Диссертация Н.А. Черпаковой состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложения, т.е. копии "Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ". Текст рукописи изложен на 114 страницах, включая 2 таблицы, 41 рисунок и одно приложение.

Во введении автор обосновывает актуальность работы, описывает степень разработанности темы исследования, формулирует цель диссертации, дает описание объекта, предмета и методов исследования. В этом разделе диссертации отмечена новизна результатов, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, аргументы в пользу теоретической и практической значимости исследования, обоснованности и достоверности результатов, отмечен личный вклад автора в проведенное исследование, приведена информация об апробации работы, публикациях, структуре

и объеме работы.

В первой главе дан краткий обзор экспериментальных и теоретических методов исследования течений несжимаемых вязкоупругих полимерных сред, при этом автор при описании экспериментальных методов в основном сосредоточил свое внимание на экспериментальных методах изучения вискозиметрических течений, т.е. таких, когда а priori известна зависимость тензора градиентов скоростей от времени.

Теоретическая часть этой главы связана, во-первых, с описанием методов воздействия на среду, когда скорость сдвига или достаточно мала (величина деформации прямо пропорциональна возникающим в материале напряжениям) или велика; во-вторых, с кратким описанием известных реологических моделей вискозиметрических течений: модели Максвелла, модели К-ВКЗ, модели Леонова-Прокунина, модели Гизекуса, Ром-Ром модели.

Во второй главе сформулированы законы сохранения массы, импульса, энергии и на основе уравнения динамики суспензии растворителя и невзаимодействующих гантелей получено определяющее реологическое соотношение, лежащее в основе базовой модели Покровского-Виноградова.

При этом несжимаемая вязкоупругая полимерная среда рассматривается именно как суспензия макромолекул полимера, движущихся в среде, образованной растворителем и другими молекулами. Такое одномолекулярное приближение в случае сравнительно медленных движений позволяет рассматривать модель молекулы как совокупность броуновских частиц (бусинок), соединенных пружинками, в роли которых выступает энтропийная упругость макромолекулы. В частном случае макромолекулу моделируют гантелью, что и приводит к формулировке реологического соотношения Покровского-Виноградова.

Как отмечает автор диссертации, расчеты вискозиметрических функций на основе модели Покровского-Виноградова позволяют установить качественное соответствие значений соответствующих функций при реальном поведении растворов и расплавов линейных полимеров.

В третьей главе приведена формулировка обобщения базовой модели Покровского-Виноградова на многомодовый случай, которое, по мнению автора работы, должно эффективно описывать течения как полимерных сред с высокой концентрацией самого полимера, так и течения разбавленных растворов гибкоцепных монодисперсных полимеров, что связано с множественностью релаксационных процессов.

При этом возникает необходимость определения целой серии параметров наведенной этими модами анизотропии. В качестве критерия выбора используется сравнение расчетной зависимости стационарной вязкости при растяжении с полученной в эксперименте.

В этой главе сформулированы и численно с помощью метода Рунге-Кутты решены системы обыкновенных дифференциальных уравнений, полученных из базовой модели Покровского-Виноградова и моделирующих одноосное растяжение и простой сдвиг. Создан программный комплекс для вычисления зависимости стационарной сдвиговой вязкости от скорости сдвига, установления вязкости при одноосном растяжении, ряда других параметров модели.

Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Используя многомодовую реологическую модель, был проведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных. Например, численно описан монотонный выход вязкости на постоянные значения при увеличении скорости растяже-

ния, графики которой на начальном участке хорошо коррелируют с экспериментальными данными.

Заключительная часть этой главы посвящена исследованию решения краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений, возникающей из обобщенной модели Покровского–Виноградова, когда полимерная многомодовая среда течет между двумя параллельными пластинами, одна из которых покоится, а другая совершает гармонические колебания с амплитудой, сопоставимой с расстоянием между пластинами.

Это, по существу, является математической интерпретацией метода малоамплитудного динамического сдвига. Зная тензор градиентов скорости деформации, который состоит из одной компоненты v_{12} , можно легко найти ненулевую компоненту тензора напряжений и проанализировать ее зависимость от частоты ω исходного возмущения. При этом автор отмечает, что при $\omega \ll \frac{1}{\tau_0}$, (τ_0 – время релаксации) материал ведет себя как вязкая жидкость, а при $\omega \gg \frac{1}{\tau_0}$ – как упругое тело; в первом случае угол сдвига фаз близок к $\frac{\pi}{2}$, а во втором – к нулю.

Иногда удобно перейти на фазовую плоскость зависимости напряжения от деформации. Прием построения фазовых портретов, фигур Лиссажу, эффективен при изучении нелинейных эффектов.

Отмечается, что при больших амплитудах возмущения и при увеличении частоты метод теряет свою эффективность.

В четвертой главе диссертации представлены основные результаты, выносимые на защиту, которые связаны с применением периодических деформаций с большой амплитудой. Идея этого метода связана с использованием интегрального преобразования Фурье, т.е. в данном случае разложением тензора напряжений по гармоникам. Правда, автор применяет очень упрощенный вариант – компонента тензора деформации представляет собой одну гармонику, частота и амплитуда которой варьируются.

Применяя описанный выше программный комплекс, удается оценить влияние частоты возмущения и параметров модели на развитие нелинейных эффектов, например, на появление и исчезновение "ступеньки" на графиках нормализованного сдвигового напряжения; амплитуды – на величины первой и второй разности нормальных напряжений: наблюдается нелинейность полученных осцилляций с удвоенной частотой относительно сдвигового напряжения. Отмечу, что выполнено сравнение полученных расчетных величин с экспериментальными данными, что позволило в известной степени завершить верификацию обобщенной модели Покровского–Виноградова.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Общая методология и методика исследования

Методы, использованные автором диссертации, подробно описаны выше. Если кратко, то в работе выполнена верификация новой обобщенной модели Покровского–Виноградова: при простых деформациях, простом сдвиге и одноосном растяжении, обеспечен выход на нелинейные эффекты, которые наблюдаются в эксперименте.

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается использованием математической модели, вывод которой основан на фундаментальных законах сохранения, тестированием и верификацией расчетных алгоритмов на ряде задач путем сравнения полученных результатов с аналитическими решениями, теоретическими и экспериментальными данными из других литературных источников.

Научная новизна полученных результатов

Н.А. Черпакова получила результаты, соответствующие критерию новизны, что подтверждаются публикациями статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций, трудах международных и внутренних конференций и других изданиях. Наиболее значимыми, по моему мнению, являются следующие:

- 1) Проведен анализ развития нелинейного отклика реологической модели Покровского–Виноградова на большие по амплитуде, периодические (частота варьируется) сдвиговые деформации, выявлено появление "ступеньки" на графике зависимости напряжения от времени.
- 2) Проведен анализ применения метода больших периодических сдвиговых деформаций к модифицированной модели Покровского–Виноградова.
- 3) Установлена связь формы и размеров фазовых портретов (фигуры Лиссажу) с параметрами воздействия и параметрами реологической модели.
- 4) Численно найдены зависимости сдвигового напряжения, первой и второй разности нормальных напряжений от значений относительных амплитуд деформаций.
- 5) Создан и апробирован программный комплекс для нахождения основных характеристик реологических моделей – основной инструмент исследования.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы обеспечена проведенным анализом новой многомодовой реологической модели (обобщение базовой модели Покровского–Виноградова), призванной выявить нелинейные эффекты, возникающие при движении растворов и расплавов высококонцентрированных полимерных сред, разбавленных растворов гибкоцепных монодисперсных полимеров.

Большой интерес как теоретический, так и практический, связан с созданным программным комплексом для расчета основных величин, характеризующих течение полимерных сред, который может быть применен при моделировании течений в сложных технологических условиях.

Замечания по диссертационной работе

1. При формулировке модели (3.1) возникает вопрос: "Каким должно быть число n ". Если мод достаточно много, то сумма может быть достаточно велика? В той или иной степени этот момент проявляется и в дальнейшем.
2. Непонятен выбор (3.3), (3.6) коэффициентов g_α, p_α . Аргумент: "Зависимости (3.3) и (3.6) показали наилучший результат при подстановке в выражения зависимости стационарной вязкости при растяжении и при их сравнении с экспериментальными данными" - явно недостаточен.
3. Как зависят коэффициенты сдвиговой вязкости η_α и времени релаксации τ_α от номера моды?
4. В пункте 3.2 для систем обыкновенных дифференциальных уравнений необходимо задавать начальные данные, от этого может зависеть существование решения при больших временах.
5. В работе нечетко отмечена грань между возможностью применения методов наложения возмущений с малой и большой амплитудами.
6. Работа существенно бы выиграла, если в качестве возмущений была бы рассмотрена сумма конечного набора гармоник.

Заключение по диссертации

Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом можно заключить, что диссертация Н.А. Черпаковой "Нелинейное поведение концентрированных растворов полимеров при больших периодических деформациях", представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности, имеет теоретический характер и может рассматриваться как завершенная научно-квалификационная работа, которая выполнена на высоком научном уровне и содержит новые результаты в рамках программы создания новых реологических моделей, адекватно описывающих течения растворов и расплавов полимерных сред с высокой концентрацией и разбавленных растворов гибкоцепных монодисперсных полимеров.

В работе приведены результаты теоретического и численного исследования новой реологической многомодовой модели, сформулированной на основе базовой модели Покровского–Виноградова. Созданный комплекс программ получил свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в печатных работах, три из которых включены в перечень ВАК. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости диссертационная работа Черпаковой Надежды Анатольевны "Нелинейное поведение концентрированных растворов полимеров при больших периодических деформациях" удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно п.9 "Положения о присуждении ученых степеней" в текущей редакции, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник лаборатории вычислительных проблем задач математической физики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.01.02 - Дифференциальные уравнения, динамические системы и оптимальное управление), доцент по кафедре дифференциальных уравнений

Ткачев /Ткачев Дмитрий Леонидович/

"10" марта 2020

Телефон: +7(383)329-76-75,
e-mail: tkachev@math.nsc.ru



Подпись Д.Л. Ткачева удостоверяю
Ученый секретарь ИМ СО РАН _____
Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Колтюга, 4
Телефон: +7(383)333-28-92;
e-mail: im@math.nsc.ru
www-страница: <http://math.nsc.ru>

И.Е. Светов