

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Кузнецовой Юлии Леонидовны «Реометрические течения полимерных жидкостей с учетом сдвигового расслоения потока», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 — механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность исследований. Диссертационная работа Ю.Л. Кузнецовой посвящена исследованию особенностей стратификации однонаправленных (одномерных по скорости и одномерных по пространственной координате) реометрических течений полимерных жидкостей. Основная трудность при осуществлении математического и физического моделирования неньютоновских жидкостей заключается не только в квадратичной нелинейности уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнением несжимаемости и другими определяющими соотношениями, но и в так называемой физической нелинейности свойств материала. В гидродинамике ньютоновской жидкости важную роль играют точные решения, описывающие изобарическое течение Куэтта, градиентное движение жидкости Пуазейля, течение Куэтта-Тейлора. Точное решение Куэтта-Тейлора используется для определения динамической (кинематической, молекулярной) вязкости жидкости. Имеется большое количество научных работ, иллюстрирующих некорректность использования приборов для определения вязкости у нелинейных жидкостей при помощи методов, основанных на точных решениях для ньютоновских жидкостей. Данная проблема особенно обостряется на немонотонных участках кривой течений полимерного материала, поскольку качественное и количественное исследование уравнений движения чрезвычайно затрудняется. В диссертации решается ряд задач с целью получения ответов на обозначенные выше проблемные вопросы. Автором выбрана модифицированная модель Виноградова-Покровского (MVP-модель), обобщающая известную модель материала Гизикуса, но в то же время ее определяющие соотношения позволяют провести аналитические исследования и в некоторых случаях точно проинтегрировать уравнения движения жидкости.

Таким образом, диссертация подготовлена по актуальной теме механики неньютоновской жидкости, поскольку до настоящего времени имеется пробел в аналитических и численных решениях задач течения жидкостей с нелинейными определяющими соотношениями и можно только констатировать отсутствие определенного запаса точных решений уравнений движения, позволяющих определять свойства материалов.

Структура и содержание диссертации. Диссертация объемом 123 страницы состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка, состоящего из 96 наименований. В диссертационной работе содержится 60 рисунков и 3 таблицы.

Во **введении** автором диссертационной работы обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, указана научная новизна и практическая значимость научных результатов, выносимых на защиту.

В **первой** главе диссертации представлен обзор литературы по теме диссертации. Автором проанализированы экспериментальные работы, в которых изучается эффект расслоения (стратификация) сдвигового течения. Уделено внимание научным публикациям, в которых исследуется гистерезис расходно-напорных характеристик и формирование плато на реологических зависимостях. Осуществлен обзор реологических моделей, используемых для описания особенностей течения полимерных жидкостей, и изучено построение реологических уравнений состояния на основе мезотруктурного подхода.

Во **второй** главе приведены математические выкладки для вывода реологического уравнения состояния модифицированной модели Виноградова–Покровского с учетом мезоструктуры полимера.

В **третьей** главе рассмотрена система эволюционных уравнений для установившегося однонаправленного сдвигового течения. Исходная система реологических уравнений MVP-модели редуцируется к системе нелинейных алгебраических уравнений, которая решена точно, а решения записаны в параметрической форме. В качестве параметра используется одна из компонент структурного тензора. Полученное точное решение исследовано автором. Анализ решения позволил выделить физически реализуемые ветви решений с последующей их интерпретацией, позволяющей использовать MVP-модель для предсказания ограничения среднеквадратического растяжения мезоструктуры полимера и построить область немонотонных участков кривой течения.

В **четвертой** главе рассматриваются четыре реометрических однонаправленных сдвиговых течений. Рассмотрено движение полимера в плоской щели, реализуемое за счет движения одной из ограничивающих поверхностей (течение типа Куэтта). Показана неединственность (неоднозначность) решений данной задачи при использовании реологических моделей с немонотонными кривыми течения. Выполнено исследование устойчивости однородного стационарного решения, результаты которого показали, что для параметров MVP-модели, обеспечивающих

немонотонность кривой течения, возмущения при превышении скоростью сдвига критического значения приводят к расхождению решения.

Далее рассмотрено установившееся сдвиговое движение, наблюдаемое в зазоре между соосными цилиндрами (течение типа Куэтта-Тейлора). Найдены точные решения в случае заданного значения вращательного момента одного из цилиндров. Построены численные решения данной задачи в квазистационарной постановке при задании скорости вращения внутреннего цилиндра.

В этой главе так же в рамках выбранной реологической модели получено решение уравнения движения, описывающее течение полимера в плоском канале под действием заданного перепада давления (течение типа Пуазейля). Построены профили скорости и распределения полей напряжения, показана эволюция мезоструктуры, изучены особенности расходно-напорной характеристики.

Аналогично были исследованы течения полимерной жидкости при колебательных воздействиях на нее. Приведены соотношения для определения зависимостей от частоты комплексных модулей, измеряемых при испытаниях в режиме вынужденных колебаний.

Пятая глава посвящена разработке алгоритма для определения параметров MVP-модели по экспериментальным данным, измеренным на капиллярном вискозиметре. Поиск параметров осуществлялся на основе аналитических решений задачи, моделирующей реометрическое течение в щели типа Пуазейля, в области допустимых значений параметров, полученных автором в третьей главе диссертационной работы.

В заключении приведены выводы по результатам диссертационного исследования.

Научная новизна. В представленной к защите диссертации в качестве основных научных результатов можно выделить:

1. Впервые для MVP-модели получены точные решения, описывающие сдвиговые (однонаправленные) реометрические течения полимерных жидкостей.
2. Определена область значений параметров MVP-модели, обеспечивающих немонотонность кривой течения.
3. Выведены ограничения на параметры MVP-модели, которые позволяют прогнозировать ограниченное относительное среднеквадратичное удлинение мезоструктуры полимера.

Научная и практическая значимость работы. В диссертационной работе приведены точные решения задач, моделирующих реометрические течения жидкостей, описываемых MVP-моделью, которые будут полезными

при выборе математических моделей, адекватно описывающих полимерные жидкости. Применение MVP-модели для нового диапазона параметров позволит улучшить прогностические свойства реометрических течений в технологических устройствах, учитывающих эффекты гистерезиса и формирования плато на зависимостях крутящего момента от угловой скорости. Исследования, приведенные в диссертации, могут служить основой для конструирования новых вискозиметров для определения свойств материала, не опираясь при этом на методики, характерные для ньютоновских жидкостей.

Достоверность и обоснованность результатов, представленных в диссертации результатов обеспечивается корректной постановкой задач, безошибочным использованием аппарата математического анализа и механики сплошных сред. Достоверность результатов вычислений подтверждается «машинной» сходимостью численных решений и качественным согласованием с имеющимися в распоряжении автора экспериментальными данными.

Результаты, представленные в диссертационной работе Ю.Л. Кузнецовой, прошли апробацию на всероссийских конференциях, представлены и обсуждены на семинарах и опубликованы в 11 печатных работах, 6 из которых в научных статьях, входящих в Перечень ВАК.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат ясно, полно и правильно отражает структуру, основные результаты и выводы диссертации.

Замечания по диссертации и автореферату. При ознакомлении с диссертационной работой и авторефератом диссертации не возникает существенных замечаний по представлению материала. В работе имеется небольшое число неточностей и опечаток, не влияющих на восприятие научных результатов. Тем не менее отмечу некоторые дискуссионные моменты, возникшие при ознакомлении с диссертацией и авторефератом:

1. Термины «сдвиговое течение» и «слоистое течение» довольно часто можно считать синонимами. Хотелось бы более четкого объяснения автором применения в диссертации термина «сдвиговое течение».
2. Мне кажется, что лучше говорить не о прямолинейном движении жидкости, а об однонаправленном течении.
3. При исследовании устойчивости линейного профиля скорости в прямолинейном течении Куэтта рассмотрены случаи разного числа слагаемых n . В тексте нет пояснения о какой-либо зависимости кривой течений (рис. 27) от параметра n . Имеется такая зависимость?

4. При численных решениях выводы о сходимости основывались на «машинной» сходимости. Всегда при уменьшении шага сетки наблюдалась близость к известным результатам?

Заключение. Диссертационная работа **Кузнецовой Юлии Леонидовны «Реометрические течения полимерных жидкостей с учетом сдвигового расслоения потока»** соответствует требованиям Постановления Правительства РФ 842 от 24 сентября 2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней» с изменениями и дополнениями №335 от 30 июля 2014 г., 21 апреля, 2 августа 2016. Автор диссертации достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физико-математических наук,
заведующий сектором
нелинейной вихревой гидродинамики ФГБУН
Института машиноведения УрО РАН

Е.Ю. Просвирыков

18.10.2019

Почтовый адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34,
ФГБУН Институт машиноведения УрО РАН.

Номер телефона: +7(343)374-20-38, +79826545223.

E-mail: evgen_pros@mail.ru

Подпись Евгения Юрьевича Просвирыкова заверяю:
ученый секретарь ФГБУН
Института машиноведения УрО РАН



А.М. Поволоцкая