

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук
Перминова Анатолия Викторовича
на диссертационную работу Кузнецовой Юлии Леонидовны
«РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ С УЧЕТОМ
СДВИГОВОГО РАССЛОЕНИЯ ПОТОКА»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности
01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Кузнецовой Ю.Л. посвящена исследованию реометрических течений полимерных жидкостей на основе реологической модели Виноградова-Покровского. Диссертанткой четко сформулирована **цель работы**, которая заключается «в анализе и верификаций нелинейного реологического мезоструктурного определяющего соотношения модифицированной модели Виноградова-Покровского (MVP-модель) в области параметров, обеспечивающих немонотонность кривой течения, в приложении к описанию реометрических течений полимерных жидкостей с учетом сдвигового расслоения потока».

В работе **впервые** для модели Виноградова-Покровского получены аналитические соотношения, устанавливающие связь со скоростью сдвига основных реологических характеристик полимерных жидкостей. В диссертации указана **не известная ранее** область значений реологических параметров, обеспечивающих немонотонность кривой течения. **Впервые** показано, что MVP-модель способна предсказывать ограниченное относительное среднеквадратичное удлинение мезоструктуры. Установлено **не известное ранее** критическое значение скорости сдвига, превышение которого приводит к неустойчивости линейного профиля скорости. Получены **новые** аналитические решения задач, в которых моделируются реометрические сдвиговые течения жидкости Виноградова-Покровского. **Впервые** MVP-модель была применена для описания расслоения сдвигового потока нелинейно-вязкой жидкости. Установлено **не известное ранее** свойство реологической модели предсказывать формирование гистерезисной петли и плато на зависимостях, измеряемых в реометрических экспериментах. В работе предложен **новый** алгоритм вычисления значений параметров MVP-модели на основе экспериментальных данных с гистерезисной петлей или немонотонностью, измеренных на капиллярных вискозиметрах.

В связи с возрастающими требованиями, например, к однородности структуры полимерных материалов и качеству изделий из них изучение реологических свойств полимерных жидкостей является **актуальной проблемой**. Важной ступенью в изучении реологических свойств жидкостей является исследование и понимание свойств реометрических течений, возникающих в различных реометрах и вискозиметрах. Например, фактически не изучены условия существования и механизмы возникновения плато на зависимостях вращательного момента от угловой скорости, гистерезиса расходно-напорной характеристики, эффекта значительного увеличения расхода жидкости при небольшом возрастании давления, называемого в литературе «спурт эффектом». Долгое время эти эффекты, наблюдаемые в реометрических течениях, объяснялись преимущественно гидродинамической неустойчивостью или проскальзыванием жидкости вдоль стенки.

В настоящее время в реометрических экспериментах с нелинейно-вязкими жидкостями для получения реологических кривых выполняется обработка экспериментальных данных, основанная на предположении формы профиля скорости, реализующейся в ячейке измерительного устройства, близкой к профилю ньютоновской жидкости. Однако, существуют полимерные жидкости, в которых наблюдается эффект

расслоения в процессе сдвигового течения. Применение, описанной выше, методики к подобным жидкостям становится некорректным. Следовательно, разработка нового подхода, принимающего во внимание формирование поля скорости, соответствующего расслоенному течению, является **интересной и актуальной задачей**.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в приложении модели Виноградова-Покровского к ранее неизученному диапазону параметров, что обогатило знания о ее прогностических возможностях. Результаты исследований могут быть **полезны** на этапе выбора реологической модели, подходящей для описания поведения полимерных жидкостей, проявляющих эффекты гистерезиса и формирования плато на зависимостях крутящего момента от угловой скорости. *Результаты, представленные в диссертации, должны послужить основанием для пересмотра существующих методик реометрических испытаний полимерных жидкостей.* С **практической** точки зрения, они дают базу для корректной обработки экспериментальных данных с учетом эффекта расслоения и позволяют оптимизировать процесс выбора подходящих для рассматриваемого материала реологических параметров модели. Найденные аналитические решения задач сдвигового течения можно использовать для верификации результатов численного моделирования реометрических течений жидкостей, описываемых MVP-моделью.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается строгостью математических постановок задач, использованием фундаментальных положений математического анализа и механики сплошных сред. Достоверность численных результатов подтверждается сходимостью решений при измельчении шага пространственной и временной сеток, а также качественным согласованием с экспериментальными данными.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения общим объемом 123 страницы, содержит 60 рисунков и 3 таблицы, список литературы включает 96 наименований.

Во **введении** обосновывается актуальность и степень разработанности темы исследования, формулируется цель, ставятся задачи работы, отражается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, перечислены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** описаны основные реологические свойства растворов и расплавов полимеров. Особое внимание уделено обзору экспериментальных работ, посвященных эффекту расслоения сдвигового течения, гистерезису расходно-напорных характеристик и формированию плато на реологических зависимостях, измеряемых на ротационных реометрах. В главе представлен обзор современных реологических моделей, используемых для описания особенностей течения полимерных жидкостей. Рассмотрены принципы мезоструктурного подхода к построению реологических уравнений состояния.

Во **второй главе** приведен вывод мезоструктурного реологического уравнения состояния модифицированной модели Виноградова–Покровского, которая была получена из анализа динамики невзаимодействующих «гантелей», движущихся в нелинейной анизотропной среде.

В **третьей главе** рассмотрено поведение системы эволюционных уравнений MVP-модели в предположении установившегося одномерного сдвигового течения, которая в данном случае преобразуется к системе нелинейных алгебраических уравнений. В результате решения системы были получены аналитические соотношения для основных реологических характеристик полимерных жидкостей, а именно, кривой течения, сдвиговой вязкости, функции первой и второй разностей нормальных напряжений, которые записываются в параметрическом виде. Проведено исследование влияния параметров MVP-модели на зависимость от скорости сдвига переменных, отражающих состояние мезоструктуры полимерной жидкости. В результате, показана способность

MVP-модели предсказывать ограниченное относительное среднеквадратичное растяжение мезоструктуры и выделен диапазон параметров, удовлетворяющих этому условию.

В четвертой главе в рамках MVP-модели проведено моделирование наиболее распространенных видов реометрических сдвиговых течений, используемых для полимерных жидкостей. Рассмотрено течение в плоской щели, реализуемое за счет движения одной из ограничивающих поверхностей. Показана множественность решений данной задачи в случае использования реологических моделей с немонотонными кривыми течения. Далее рассмотрено криволинейное установившееся одномерное сдвиговое течение, реализуемое в зазоре между соосными вращающимися цилиндрами. Найдены аналитические решения данной задачи в случае заданного значения удельного вращательного момента. Показано, что для параметров MVP-модели, обеспечивающих немонотонность кривой течения, существует диапазон значений вращательного момента, в котором MVP-модель предсказывает существование трех профилей скорости, один из них соответствует расслоенному течению. Для третьего вида течения в плоском канале под действием заданного перепада давления найдены аналитические соотношения для профиля скорости, распределения полей напряжения и эволюции мезоструктуры, а также зависимость перепада давления от расхода, измеряемая в реометрических испытаниях на капиллярных вискозиметрах. Установлено, что для значений параметров реологической модели, обеспечивающих немонотонность кривой течения, возможна реализация двух различных профилей скорости, один из которых соответствует расслоенному течению. В результате при контролируемых значениях перепада давления на расходно-напорной кривой наблюдается гистерезисная петля, а в экспериментах с контролируемым расходом жидкости зависимость становится немонотонной.

В пятой главе диссертации предложен алгоритм определения параметров MVP-модели по немонотонным экспериментальным данным щелевого капиллярного вискозиметра, которые представляют собой расходно-напорную зависимость либо с гистерезисной петлей, либо немонотонную кривую. Данный алгоритм основывается на полученном в главе 4 решении задачи о течении в канале под действием перепада давления. Поиск параметров происходит в области, обеспечивающей немонотонность кривой течения.

В заключении перечислены основные результаты исследований, изложенных в диссертации.

К достоинствам диссертации следует отнести, приведенный автором, литературный обзор. Все задачи, представленные в диссертации, имеют достаточно ясную математическую формулировку. Результаты решения задач подробно проанализированы, из них выделены основные положения, которые лаконично сформулированы в конце каждой главы и в заключении к диссертации. Диссертант показал хорошее владение современными численными методами. Полученные в диссертации результаты позволяют расширить область применимости реологической модели Виноградова-Покровского на класс жидкостей, проявляющих эффект разделения сдвигового потока на слои и связанные с ним явления гистерезиса и формирования плато на зависимостях. Результаты исследований показывают необходимость корректировки стандартной методики обработки экспериментальных данных реологических испытаний жидкостей, с изменяющейся в процессе течения структурой.

К работе могут быть высказаны следующие **замечания**:

1. В главе 2 описан вывод реологической модели Виноградова-Покровского. Из текста главы, а так же п. 1 «положений выносимых на защиту» не ясно, в работе представлен оригинальный вывод модели или же воспроизведен ранее известный. Если воспроизведен ранее известный вывод, то необходимы ссылки на работы, где этот вывод представлен впервые. На странице 42 сказано, что в диссертации предложена «модификация нулевого приближения модели Виноградова-Покровского». Однако нет четкого указания на то, в чем заключается эта

- модификация? Как выглядит нулевое приближение модели в оригинале? Нет ссылок на работы, где эта модель получена или приведена в оригинальном виде.
2. В тексте диссертации есть термины, которые регулярно используются автором без пояснения. Например, довольно часто упоминаются первая и вторая разность нормальных напряжений, говорится о важности этих величин, обсуждается их зависимость от скорости сдвига и других параметров. Однако не поясняется, почему знание первой или второй разности нормальных напряжений важно при рассмотрении сдвиговых течений вязкоупругих жидкостей, в чем заключается физический смысл этих параметров? Другой случай. На стр. 63 впервые появился термин «аппаратная скорость сдвига». Пояснение этого термина, хотя и не очень ясное, дается только на стр. 69. Далее этот термин регулярно используется в тексте.
 3. В главе 4 представлено решение ряда задач, где рассматриваются реометрические течения. В пунктах, описывающих постановку задач, очень не хватает рисунков, поясняющих их геометрию.
 4. В четвертой главе диссертации есть упоминания о совпадении результатов теоретических расчетов реометрических течений с экспериментом, но нет ссылок на соответствующие работы. Для наглядности было бы неплохо наложить результаты теоретических расчетов на экспериментальные графики, либо привести результаты экспериментов в тексте для демонстрации качественного совпадения.

Приведенные замечания не снижают **общего положительного впечатления** от работы. Автореферат отражает содержание диссертации.

Заключение. Диссертационная работа **Кузнецовой Юлии Леонидовны** выполнена на хорошем научном уровне, она представляет собой законченную научно-квалификационную работу, удовлетворяющую всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям. **Кузнецова Юлия Леонидовна** заслуживает присуждения степени **кандидата физико-математических наук** по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры общей физики факультета Прикладной математики и механики ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

614990, Пермский край, г. Пермь - ГСП, Комсомольский проспект, д. 29, а. 245, perminov1973@mail.ru, +7 (342) 2-198-025

Перминов Анатолий Викторович
23.10.2019

Я, Перминов Анатолий Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку



Перминова А.В.

ЗАВЕРЯЮ:

секретарь ПНИПУ

В.И. Макарович

20 2019 г.