

УТВЕРЖДАЮ

Директор  
Федерального государственного  
бюджетного научного учреждения  
«Федеральный исследовательский  
центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской  
академии наук» доктор физико-  
математических наук



  
Н. В. Волков

«18» сентября 2018 г.

### О Т З Ы В

ведущей организации на диссертационную работу Кузнецова Александра Евгеньевича «Влияние реологических характеристик полимерного расплава на структуру вихревого течения в сходящемся канале с прямоугольным сечением», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Кузнецова Александра Евгеньевича «Влияние реологических характеристик полимерного расплава на структуру вихревого течения в сходящемся канале с прямоугольным сечением» соответствует специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы, является завершённым научным исследованием, имеет научную ценность и практическую значимость.

1. Актуальность. Хорошо известно, что полимерные материалы часто имеют уникальные физико-химические и механические свойства. С их помощью конструируют высокопрочные анизотропные волокна и плёнки. В расплавленном состоянии они ведут себя как неньютоновские жидкости со сложной реологией, способные к большим и длительно развивающимся обратимым деформациям. В высокоэластическом состоянии они могут набухать перед растворением, демонстрировать высокую вязкость. Эти особенности полимеров связаны с их строением в виде цепей и большой молекулярной массой, наиболее ярко они проявляются у линейных полимеров.

Для количественного описания течений полимерных расплавов и растворов необходимо знать их реологию. Наиболее подходящей для такого рода течений является реологическая модель Виноградова – Покровского, основанная на микроструктурном подходе. Более точно, используется модифицированная модель, учитывающая немонотонный характер градиентной зависимости вязкости при растяжении и наличие остаточной вязкости с ньютоновским законом поведения. Поэтому верификация этой модели на конкретной задаче трёхмерного течения полимерного расплава в сходящемся канале является актуальной проблемой.

2. Содержание работы. Диссертация Кузнецова А. Е. изложена на 121 странице (включая 2 таблицы и 29 рисунков) и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 86 наименований и приложения.

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и решаемые в работе задачи. Приведены основные результаты и

положения, выносимые на защиту. Обсуждаются научная новизна, практическая значимость и достоверность проведённых исследований.

**Первая глава** является обзорной. В ней описаны основные подходы к моделированию течений полимерных расплавов, используемые на настоящее время реологические уравнения состояния различного типа. Достаточно подробно указаны свойства полимерных жидкостей, которые можно исследовать с помощью конкретной реологической модели.

**Во второй главе** анализируются различные численные методы, которые могут быть использованы при преобразовании уравнений реологического определяющего соотношения в дискретную форму и проведении расчётов трёхмерного течения полимерного расплава. Также приведено описание имеющихся технологий распараллеливания расчётов. Показано, что более перспективной из них для решения задач диссертации является технология CUDA параллельных вычислений на многопроцессорных графических картах.

**В третьей главе** приводится и обсуждается модифицированная реологическая модель Виноградова – Покровского. Она позволяет проследить связь между макро- и микрохарактеристиками полимерной системы. Адекватность реологического определяющего соотношения проведена путём сравнения с течениями реальных полимерных жидкостей. Установлено, что эта модель может быть принята за начальное приближение как при описании нелинейных и вязкоупругих свойств, так и при описании стационарного сдвигового течения полимерных растворов и расплавов; модель также даёт хорошее согласование с экспериментальными данными результатов моделирования нелинейной вязкоупругости полимерного материала при больших периодических деформациях.

**Четвертая глава** является наиболее объёмной и посвящена непосредственно решению задач, необходимых для проверки адекватности модели Виноградова – Покровского. Для этого изучается влияние реологических характеристик полимерного расплава на размеры вихревой области, возникающей при течении расплава на входе в щелевой канал (заметим, что для ньютоновской жидкости вихревые зоны не возникают). В численных экспериментах найдены возвратные течения полимерного расплава перед входом в узкую часть канала и показано, что зависимость размеров вихря от температуры расплава имеет немонотонный характер и проходит через максимум. Установлено, что течение расплава перед входом в щелевой канал является трёхмерным. Размеры вихревой области, вычисленной в сечениях на различных расстояниях от оси канала, вначале увеличиваются при приближении к твёрдой стенке, а затем уменьшаются. Приведённые особенности наблюдаются и в реальных экспериментах на расплавах разветвлённого полиэтилена малой плотности. Проведённые в этой главе исследования позволяют утверждать, что реологическая модель Виноградова – Покровского качественно описывает известные эксперименты.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

**В приложении А** приведены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, разработанных для численного решения нелинейных трёхмерных задач вязкоупругих сред с реологическим уравнением состояния в дифференциальной форме.

**3. Научные результаты и их новизна.** В диссертационной работе Кузнецова А. Е.

1) разработаны и реализованы математическая модель и оригинальный алгоритм моделирования и расчёта течений расплавов полимеров в каналах с внезапным сужением на основе модифицированной реологической модели Виноградова – Покровского;

2) изучено влияние вязкости полимера и время его релаксации на гидродинамическую структуру течения в области входа в щелевой канал. Обнаружен немонотонный характер зависимости размеров вихревой зоны и дано его объяснение;

3) выявлен винтовой характер трёхмерного потока, заключающийся в увеличении интенсивности вихревых течений при удалении от оси канала. Показано, что максимум скорости достигается в непосредственной близости от входа в узкую часть канала, при этом профиль скорости в щелевой части устанавливается на значительном расстоянии от входа в канал. Все результаты иллюстрированы хорошо выполненными рисунками.

4. Достоверность и обоснованность результатов. Обоснованность и достоверность результатов диссертации основывается на корректности постановок задач, использовании апробированных численных методов и алгоритмов, детальных методических расчётах тестовых задач, сопоставлении результатов численных расчётов с данными экспериментов и расчётами других авторов при упрощении моделей.

5. Значимость для науки и практики выводов и рекомендаций диссертанта. Развита методология математического и численного моделирования процессов переноса в текучих полимерных средах. Результаты диссертации позволяют сделать вывод о пригодности реологической модели Виноградова – Покровского для описания реальных течений расплавов полимеров в различных узлах технологического оборудования. Это и теплообменники, подшипники скольжения, центрифуги, определённые виды миксеров, буровые колонны и т. д.

6. Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует её содержанию.

7. Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. Основные результаты диссертации доложены на всероссийских и международных конференциях и напечатаны в виде полнотекстовых публикаций докладов, опубликованы в 14 работах, которые соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают содержание, выводы и заключение диссертации. Пять статей напечатаны в журналах из списка ВАК РФ для представления результатов кандидатской диссертации.

#### 8. Недостатки по содержанию и оформлению диссертации.

1. Материал первой главы имеется в любом учебном пособии по механике сплошных сред или курсах по МЖГ.

2. Главы 2, 3 также не содержат результатов, относящихся к автору диссертации. Они все хорошо известны. Его утверждение к выводам третьей главы (с. 70), что им «получено модифицированное реологическое определяющее соотношение...», неверно, поскольку оно было предложено в работе [18].

3. Раздел «Личный вклад автора» отсутствует в автореферате, а из текста на с. 12 диссертации следует, что автор все результаты получил самостоятельно. Однако все публикации (исключая второстепенную работу [12]) совместные с большим числом соавторов. Поэтому возникает вопрос о действительном научном вкладе диссертанта в получении результатов. К диссертации не приложена справка с указанием вклада каждого соавтора в основных статьях.

4. Для отыскания стационарного решения использовался метод установления, с. 85. Однако стационарные нелинейные краевые задачи в зависимости от значений входящих параметров могут иметь несколько решений. Каким образом при численном решении методом установления находилось именно нужное стационарное решение? Или имелись доводы в пользу его единственности, какие?

#### 9. Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертациям.

Замечания 1, 2, 4 не являются существенными. Диссертационная работа является завершённым научным исследованием, выполненном на достаточно высоком научном уровне, в которой разработан оригинальный программный продукт для моделирования полимерных сред в сходящемся канале. Учитывая актуальность тематики, новизну и практическое значение полученных результатов, считаю, что диссертация «Влияние реологических характеристик полимерного расплава на структуру вихревого течения в сходящемся канале с прямоугольным сечением» удовлетворяет всем требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-

математических наук, а её автор Александр Евгеньевич Кузнецов заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составлен заведующим отделом дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования СО РАН д.ф.-м.н., профессором Андреевым Виктором Константиновичем.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию обсуждены составом отдела дифференциальных уравнений механики Института вычислительного моделирования СО РАН на семинаре «Математическое моделирование в механике» под руководством д.ф.-м.н., профессора Андреева В. К. 14 сентября 2018 года, протокол № 1.

Заведующий отделом  
дифференциальных уравнений  
механики ИВМ СО РАН –  
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН  
д.ф.-м.н., профессор

В. К. Андреев

17 сентября 2018 г.

Подпись В. К. Андреева удостоверяю:

Учёный секретарь ИВМ СО РАН –  
обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН  
к.ф.-м.н.



А. В. Вяткин

Адрес: 660036, Красноярск, Академгородок, 50/44, ИВМ СО РАН  
Тел.: (391)290-75-94  
E-mail: andr@icm.krasn.ru

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр  
Сибирского отделения Российской академии наук»  
660036, г. Красноярск, Академгородок, 50  
(391) 243-45-12, fic@ksc.krasn.ru, http://ksc.krasn.ru