

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Пермского федерального
исследовательского центра
Уральского отделения
Российской академии наук,
доктор технических наук, профессор,
академик РАН



 А. А. Барях

« 18 » ноября 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Борзенко Евгения Ивановича
«Моделирование неизотермических течений реологически сложной жидкости при
заполнении плоских и осесимметричных каналов»,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертационная работа Борзенко Е.И. посвящена численному моделированию неизотермических течений неньютоновских жидкостей при наличии свободной поверхности с учетом диссипации механической энергии, зависимости реологических характеристик от температуры и поверхностного натяжения.

Актуальность темы диссертации

Гидродинамические процессы при наличии свободных границ широко представлены в различных технических приложениях и природе. Течения реологически сложных жидкостей при заполнении емкостей, реализуемые, в частности, при переработке полимерных композиций методом литья, один из примеров подобных процессов. В общем случае течение полимерной жидкости при заполнении емкости характеризуется сложным реологическим поведением, неизотермичностью, химическими превращениями, наличием свободной поверхности. Повышение эффективности и безопасности производства, новые рецептуры полимерных композиций, приводящие к изменению их свойств, многообразие геометрических форм изделий обуславливают необходимость оптимизации существующих и разработку новых технологических режимов переработки. Решение возникающих при этом задач осуществляется методами физического и математического моделирования. Сложность математических моделей, адекватно описывающих современное физическое представление рассматриваемых процессов, их многопараметричность предполагают также разработку эффективных численных алгоритмов. Всё вышеперечисленное определяет актуальность выполненных исследований.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 252 наименования. Работа содержит 136 рисунков и 15 таблиц. Общий объем диссертации составляет 251 страницу.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, отмечена научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, описаны методология и методы исследования, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **первой главе** описаны гидродинамические процессы, реализующиеся в технологии переработки полимерных жидкостей методом литья. Сформулирована общая математическая постановка задачи о неизотермическом течении неньютоновской жидкости со свободной поверхностью. Записаны дифференциальные уравнения, описывающие теплоперенос и движение сплошной среды, реологические уравнения состояния, граничные условия. Проведен литературный обзор численных методов расчета течений вязкой жидкости со свободной поверхностью.

Во **второй главе** приведено описание вычислительной технологии, используемой в работе. Методика решения поставленной задачи основана на методе контрольного объема для расчета полей искомых характеристик в области течения. Дискретизация дифференциальных уравнений движения и энергии выполнена на разнесенной сетке. Уравнение неразрывности удовлетворяется с помощью процедуры SIMPLE.

Свободная поверхность на дискретном уровне представляется с помощью упорядоченного набора маркеров, равномерно расположенных вдоль нее. Маркеры являются расчетными узлами искомых переменных, при этом вычисления составляющих вектора скорости проводятся с помощью метода инвариантов. Представлены модели движения линии трехфазного контакта, исключаяющие сингулярность традиционной постановки задачи в ее окрестности.

В **третьей главе** сформулирована математическая постановка задачи и проведено параметрическое исследование процесса заполнения вертикального плоского канала / вертикальной круглой трубы неньютоновской жидкостью в поле силы тяжести в изотермических условиях. Моделирование проведено для случая ньютоновской, степенной и бингамовской жидкостей. Представлены результаты параметрических исследований установившейся формы свободной поверхности, распределения кинематических и динамических характеристик потока, топограммы массораспределения. Выявлены различные структуры течения вязкопластичной жидкости и построены диаграммы этих режимов.

В **четвертой главе** представлены результаты заполнения плоского канала вязкопластичной жидкостью с учетом диссипации механической энергии и зависимости реологических характеристик от температуры по экспоненциальному закону. Показаны результаты, демонстрирующие эволюцию теплофизических параметров с течением времени. Выявлены различные структуры потока с квазитвердыми ядрами в окрестности линии симметрии и свободной поверхности и «замерзшим» слоем на твердой стенке.

В **пятой главе** приведены результаты исследования процесса заполнения осесимметричного канала вязкой жидкостью в изотермических условиях в поле силы тяжести с учетом сил поверхностного натяжения. Динамика линии контакта описывается эмпирической формулой, которая связывает функциональной зависимостью значения

равновесного и динамического краевого угла, а также скорость контактной линии. При этом предполагается, что скорость линии контакта разлагается на две составляющие: скорость скольжения жидкости вдоль твердой стенки в окрестности линии трехфазного контакта и скорость движения линии контакта за счет накатывания свободной поверхности на стенку. Тестирование вычислительной методики проведено на задаче растекания первоначально сферической капли вязкой жидкости по твердой поверхности.

В **заключении** сформулированы основные результаты проведенных исследований.

Научная новизна результатов диссертации

Выполненные исследования содержит элементы новизны, в качестве которых можно выделить следующие:

- разработана оригинальная вычислительная методика на основе метода контрольного объема и процедуры SIMPLE для расчета характеристик потока и метода инвариантов для реализации естественных граничных условий на свободной поверхности;
- разработаны модели динамики контактной линии на основе граничного условия проскальзывания с учетом накатывания фронта свободной границы на стенку, исключающие сингулярность традиционной постановки задачи;
- получены новые критериальные зависимости характеристик течения, реализующегося при изотермическом заполнении плоского канала / круглой трубы с учетом неньютоновского поведения сред, включая псевдопластичность, дилатансию, вязкопластичность, выявлены режимы неустойчивого поведения свободной поверхности, проведена классификация структуры потока вязкопластичной жидкости в зависимости от значений определяющих параметров;
- выявлены основные закономерности и получено количественное описание гидродинамических и теплофизических процессов, реализуемых при неизотермическом заполнении канала неньютоновской жидкостью с учетом зависимости реологических параметров от температуры.

Достоверность и обоснованность результатов диссертации

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием базовых уравнений физико-химической гидродинамики, адекватно описывающих физическое содержание исследуемых процессов, и подтверждается тестовыми расчетами, согласованием полученных результатов с данными вычислительного и физического экспериментов других авторов.

Основные научные результаты, содержащиеся в диссертации, достаточно полно изложены в 36 опубликованных работах, в том числе 16 статьях в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора наук (из них 3 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science, 10 статей в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, входящем в Web of Science). Результаты диссертации докладывались и обсуждались на международных и всероссийских научных конференциях.

Автореферат соответствует содержанию диссертации и достаточно полно отражает результаты исследований.

Теоретическая и практическая значимость диссертации

Теоретическая значимость диссертации определяется полученными новыми знаниями, способствующими более глубокому пониманию процессов гидродинамики и теплопереноса для неньютоновских сред при наличии свободной поверхности. Результаты расчетов, разработанные вычислительные методики и программный комплекс могут использоваться при выборе технологического регламента и конструировании соответствующего оборудования в производстве изделий методом литья на таких предприятиях, как АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (г. Бийск, Алтайский край), ФГУП «Федеральный центр двойных технологий «СОЮЗ» (г. Дзержинский, Московская обл.), АО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (г. Пермь) и в других организациях, где реализуется переработка жидких сред методом литья.

Замечания по диссертации

1. Для устранения сингулярности реологических моделей вязкопластичной жидкости чаще всего используется способ из [166] списка литературы. Автор выбирает способ, описанный в работе [164], без дополнительных обоснований.

2. При рассмотрении неизотермического заполнения каналов в качестве граничного условия на входной границе используется решение для одномерного установившегося неизотермического течения соответствующей жидкости. Однако известно, что устойчивость стационарного решения подобной задачи реализуется при определенных значениях безразмерных параметров. Из текста диссертации непонятно, как поступать в том случае, когда параметры задачи не обеспечивают устойчивость решения.

3. В диссертации демонстрируются колебательные режимы поведения характеристики свободной границы при определенных значениях параметров задачи для псевдопластичной и вязкопластичной жидкостей. Описание какой-либо гипотезы объяснения подобного эффекта в работе отсутствует.

Заключение

По своим целям и задачам, содержанию и методам исследования диссертация Борзенко Е.И. соответствует паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки) по областям исследования «Реологические законы поведения текучих однородных и многофазных сред при механических и других воздействиях» (п. 1 паспорта специальности), «Тепломассоперенос в газах и жидкостях» (п. 15 паспорта специальности), «Аналитические и численные методы исследования уравнений кинетических и континуальных моделей однородных и многофазных сред (конечно-разностные методы)» (п. 18 паспорта специальности).

Диссертация Борзенко Евгения Ивановича «Моделирование неизотермических течений реологически сложной жидкости при заполнении плоских и осесимметричных каналов» является самостоятельной, логически завершенной научной работой, в которой разработаны теоретические положения динамики неньютоновских жидкостей при наличии свободной поверхности с учетом вязкой диссипации механической энергии и зависимости реологических параметров от температуры, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее теоретическое значение для развития механики жидкости и практическое значение для прогнозирования эффективности технологических процессов переработки жидких сред методом литья. Диссертация

удовлетворяет требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., № 842, ред. от 01.10.2018), предъявляемых ВАК к докторским диссертациям, а ее автор Борзенко Евгений Иванович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв рассмотрен и одобрен на научном семинаре лаборатории вычислительной гидродинамики Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук – филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (протокол № 5/19 от 29.10.2019) и утвержден единогласно на заседании ученого совета ИМСС УрО РАН (протокол № 06-19 от 05.11.2019.)

Зав. лабораторией вычислительной гидродинамики
Института механики сплошных сред УрО РАН – филиала ФГБУН
Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН,
доктор физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы), профессор



Любимова Татьяна Петровна

18.11.2019 г.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Пермский федеральный исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
614990, г. Пермь, ул. Ленина, 13а.
(342) 212-60-08; psc@permisc.ru; <http://www.permisc.ru>

Подпись Любимовой Т.П.
Удостоверяю
Должность: специалист по кадрам
Инициалы / Фамилия И.О.В.

