

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

Актуальность темы диссертации

Заполнение объема жидкостью представляет сложный технологический процесс, который требует тщательного контроля всех этапов. В качестве примера можно привести литье под давлением – широко распространенный метод изготовления пластмассовых деталей. Задачей, на решение которой направлена работа Борзенко Е.И., является исследование заполнения емкостей в плоской и осесимметричной постановках в приближении ньютоновского и неньютоновского поведения жидкости. Формования изделий из полимерных материалов осуществляется наполнением объемов различной геометрии жидкой средой. Микроструктура формуемого образца, его теплофизические и механические свойства существенно зависят от истории процесса заполнения. Процесс изготовления изделий из высокоэнергетических наполненных полимерных композиций (твердые ракетные топлива) является пожаровзрывоопасным, температура материала должна соответствовать значениям, обеспечивающим безопасный режим переработки. Проведение натурных экспериментов не всегда возможно, а иногда является невозможным. Несмотря на большое количество исследований, посвященных заполнению емкостей в плоской и осесимметричной постановках в приближении ньютоновского и неньютоновского поведения жидкости, в этих исследованиях не уделяется внимание или мало внимания кинематике течений и эволюции свободной поверхности в зависимости от значений реологических параметров среды и температуры. Поэтому актуальность математического / численного

моделирования процессов заполнения, определяется практической значимостью и является актуальной для изучения соответствующих технологических процессов.

Общая характеристика работы.

Диссертация Е. И. Борзенко состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 252 наименования. Текст рукописи включает 251 страницу (15 таблиц и 136 рисунка).

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи, аргументирована научная новизна исследований, показана теоретическая и практическая значимость полученных результатов, 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 движения и теплообмен сплошной среды; реологические уравнения состояния с учетом зависимости реологических параметров от температуры; граничные условия. Проведен литературный обзор численных методов расчета течений вязкой жидкости со свободной поверхностью.

Во **второй главе** приведены характеристики вычислительной технологии, используемой в работе. Методика решения поставленной задачи основана на методе контрольного объема для расчета полей искомых величин в области течения и метода инвариантов для реализации граничных условий на свободной поверхности. Свободная поверхность на дискретном уровне представляется с помощью упорядоченного набора маркеров, равномерно расположенных вдоль нее. Маркеры являются расчетными узлами искомых переменных. В работе проведен анализ способов устранения сингулярности в окрестности линии трехфазного контакта.

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.

В четвертой главе представлены результаты заполнения плоского канала вязкопластичной жидкостью с учетом зависимости реологических параметров от температуры и вязкой диссипации механической энергии.

В пятой главе представлены результаты исследования процесса заполнения осесимметричного канала вязкой жидкостью в изотермических условиях в поле силы тяжести с учетом сил поверхностного натяжения.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационного исследования.

Общая методология и методика исследования.

По содержанию и основным результатам диссертация Е.И. Борзенко близко соответствует направлению «Вычислительная гидродинамика», которое в настоящее время является составной частью специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы. Результаты, представленные в диссертации, получены с применением современных численных методик как традиционных, так и оригинальных, разработанных и реализованных автором работы. Расчет неизотермических течений неньютоновских сред осуществляется с использованием метода контрольного объема. В случае течения вязкопластичных жидкостей особенность бесконечной вязкости в областях малых скоростей деформации исключается путем регуляризации используемых реологических соотношений. Для численной реализации динамических граничных условий на свободной поверхности используется метод инвариантов. Для расчета кривизны и обеспечения равномерности сетки на свободной границе используется аппроксимационный сглаживающий сплайн. Движение линии трехфазного контакта осуществляется способами, учитывающими механизмы скольжения и накатывания фронта на твердую стенку для значений динамического краевого угла отличного от π .

Достоверность и обоснованность представляемых результатов обеспечивается использованием современных математических моделей механики жидкости, которые тщательно верифицированы путем многочисленных численных экспериментов и согласованием полученных результатов с данными теоретических и экспериментальных исследований других авторов.

Научная новизна полученных результатов.

На мой взгляд, основной положительной стороной работы является попытка объединения в единую математическую модель процессов течения жидкостей с учетом неньютоновского поведения при наличии свободной поверхности с учетом динамики линии трехфазного контакта и с учетом зависимости температуры процесса через зависимость параметров от температуры.

Используя разработанные численные алгоритмы реализации математической модели, Е.И. Борзенко получил результаты, соответствующих критерию новизны, что подтверждается публикациями статей в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов докторских диссертаций, трудах международных и внутренних конференций и других изданиях. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, являются следующие:

- Сформулированы математические постановки задач о нестационарных неизотермических течениях реологически сложных жидкостей со свободной поверхностью, в том числе с учетом сил поверхностного натяжения, и разработаны численные алгоритмы их решения для расчета характеристик потока и метода инвариантов для реализации естественных граничных условий на свободной поверхности.
- Установлено, что разработанные модели динамики контактной линии на основе граничного условия проскальзывания с учетом накатывания фронта свободной границы на стенку исключают сингулярность традиционной постановки задачи для значений краевого угла отличного от π .

- В ходе параметрических исследований получены новые критериальные зависимости характеристик течения, реализующегося при изотермическом заполнении плоского канала / круглой трубы с учетом неньютоновского поведения сред, включая псевдопластичность, дилатансию, вязкопластичность, описываемых известными реологическими моделями.
- Выявлены режимы одномерного течения вязкопластичной жидкости в круглой трубе / плоском канале с реологическими параметрами, зависящими от температуры, характеризующиеся образованием квазитвердого ядра вблизи линии симметрии и застойной зоны возле твердой стенки.
- 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.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость результатов определяется обогащением физических моделей динамики жидкости и их адекватным математическим описанием, для разрешения известных особенностей существующих реологических моделей неньютоновской жидкости и традиционной математической постановки задачи динамики жидкости при наличии свободной поверхности и линии трехфазного контакта. Параметрические исследования кинематических и динамических характеристик рассматриваемых течений позволяют получить новые знания в области физико-химической гидродинамики неньютоновских сред.

Разработанные средства математического моделирования могут использоваться при проектировании новых и модернизации существующих технологических процессов переработки полимерных материалов методом литья под давлением.

Результаты параметрических исследований процесса заполнения емкостей, как базовой стадии технологии методом литья, позволяют оценить влияние неизотермичности, реологического поведения полимерных жидкостей, геометрии и т.п. на структуру потоков и особенности течений, в том числе их

устойчивости, и, как следствие, прогнозировать качество и характеристики формуемого изделия.

Результаты работы могут найти применения в следующих организациях: ФГУП ФЦДТ «Союз», г. Дзержинский; АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск; ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск; ИМСС УрО РАН, г. Пермь; ФГУП НИИПМ, г. Пермь; ИГ им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск.

Замечания по диссертационной работе.

1. Сначала отмечу несколько небрежностей допущенных при оформлении работы. Во введении приведены имена отечественных и зарубежных исследователей без указания ссылок в списке литературы. При записи уравнения (1.1) допущена неточность. Указано, что $\mathbf{E}$ единичный тензор. На стр. 220 отсутствует ссылка на номер таблицы. Имеются другие несущественные небрежности в оформлении. В автореферате приведены ссылки только на работы выполненные в соавторстве с другими исследователями. В названии диссертации выделены НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИЕ процессы, хотя такие процессы рассматриваются только в четвертой главе.
2. В таблице 3.5 (стр 95) приведена зависимость относительной ошибки от шага сетки для тестового расчета. Чем можно объяснить, что при одних и тех же размерах сетки относительная ошибка в расчетах плоского и осесимметричного каналов существенно отличаются друг от друга? Кроме того, при $\alpha = 0$ ошибка растет после определенного значения шага сетки а при $\alpha=1$ продолжает убывать. Не означает ли это, что расчетам в случае плоского канала нельзя доверять.
3. В главе 3 в качестве основной реологической модели рассмотрена модель Балкли-Гершеля. При этом указана ссылка на работу 1889 г.. Хотелось бы видеть небольшой исторический обзор по дальнейшему использованию и модификации этой модели до настоящего времени.
4. Выводы главы 5 утверждают, что для малых значениях капиллярного числа ($Ca < 0.01$) гравитационные силы несущественно влияют на установившуюся форму свободной поверхности в случае течения вязкой

жидкости. Можно ли обобщить подобное утверждение на жидкости с более сложным реологическим уравнением.

Заключение по диссертации. Диссертация и автореферат написаны ясным научным языком, хорошо иллюстрированы. В целом, можно заключить, что диссертация Е. И. Борзенко «МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ПЛОСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛОВ», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы, соответствует паспорту специальности, имеет теоретический характер и может рассматриваться как научная работа, в которой на основании выполненных исследований разработаны теоретические положения проблемы динамики неньютоновских жидкостей при наличии свободной поверхности с учетом вязкой диссипации 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.

Результаты работы представлены на всероссийских и международных конференциях и с достаточной полнотой опубликованы в печатных работах, входящих в перечень ВАК в действующей редакции. Автореферат диссертации полно и правильно отражает её содержание.

По актуальности, новизне, научной и прикладной значимости, диссертационная работа Борзенко Евгения Ивановича «МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНОЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ПЛОСКИХ И ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛОВ», удовлетворяет требованиям ВАК России, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук согласно п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в текущей редакции, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-

математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник лаборатории фильтрации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения

Российской академии наук, доктор физико-математических наук (05.13.18 –

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ),

старший научный сотрудник (01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



/Мошкин Николай Павлович/

«8» ноября 2019 г.

Телефон: +7(383) 333-33-12,

e-mail: nikolay.moshkin@gmail.com

Подпись Н.П.Мошкина удостоверяю:

Ученый секретарь ИГиЛ СО РАН



/И.В. Любашевская /

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15

Телефон: +7(383) 333-21-66;

e-mail: info@hydro.nsc.ru

www-страница: <http://www.hydro.nsc.ru>

