

Отзыв официального оппонента на диссертацию

Фролова Олега Юрьевича

**«Влияние вязкой диссипации на характеристики течения жидкости при
заполнении емкостей»**

**на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 01.02.05 - Механика жидкости газа и плазмы**

Актуальность темы

Интенсивное развитие науки и техники в настоящее время формирует все более сложные проблемы, специфика которых требует совместного решения сложных мультифизических задач. В частности, такими важными задачами являются изучение особенностей течений как простых, так и реологически сложных жидкостей не только в простых – модельных условиях, – но и в областях реальной геометрии и, иногда, в реальном времени. При этом широкое использование получения изделий методом литья под давлением в химической промышленности, металлургии, пищевой промышленности требует рассмотрения существенно неизотермических и нестационарных технологических процессов. Заполнение пресс-форм реологически сложной жидкостью, например, раствором или расплавом полимера, является часто неотъемлемой стадией технологического процесса получения изделий и реализуемые на практике режимы заполнения часто определяют характеристики изделий. Проводимые в этой области исследования позволяют в многих случаях предложить рекомендации, способствующие как повышению качества получаемых изделий, так и интенсификации технологических процессов.

Сопутствующие заполнению емкостей процессы сложны и многообразны: гидродинамика в геометрически сложных элементах технологического оборудования, процессы теплопереноса и тепловыделения при течении, изменение реологического поведения деформируемой среды, наличие свободной поверхности, физико-химические превращения материала и т.д. Все это требует детального исследования, чем и определяется актуальность диссертационной работы.

Немалую роль в интенсификации исследования этих проблем играет то, что современные вычислительные комплексы и способы использования их ресурсов (вычислительная мощность, доступность, современные способы проведения

вычислительного эксперимента и его анализа) позволяют в принципе решать эти задачи. Естественно, решение таких задач опирается в основном на численные методы, что требует развития (адаптации, модификации, обобщения ...) как известных методов решения, так и формулировки и разработки новых подходов и алгоритмов решения сформулированных задач.

Исследование методов решения уравнений гидродинамики исторически является одной из наиболее актуальных задач в современной механике жидкостей, газов и плазмы. Одним из широко используемых методов решения уравнений в частных производных в задачах гидромеханики является метод контрольного объема, применяемый как для структурированных, так и неструктурированных сеток, состоящих из элементов произвольной формы, в гидродинамике часто называемый методом Патанкара. Специфика рассматриваемых в диссертационной работе связана с факторами, существенно усложняющими исследование – наличием свободной поверхности и неизотермичностью процесса заполнения пресс-форм.

Диссертационная работа посвящена изучению влияния вязкой диссипации и теплообмена на границах исследуемой области на характеристики течения жидкости при малых числах Рейнольдса при заполнении емкостей. Исследование опирается на достаточно надежный математический в виде системы уравнений в частных производных, служащей для описания неизотермической гидродинамики течений на базе системы уравнений Навье - Стокса и теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Диссертантом изучены и критически анализируются работы других исследователей, связанные с постановкой задач гидродинамики неизотермических фонтанирующих течений и применяемых методах численного исследования этих задач. Список использованной литературы содержит 137 наименований.

Автор грамотно использует математический аппарат, используемый при формулировке математической модели исследуемых процессов и уверенно применяет выбранные методы численного исследования.

Для подтверждения теоретических положений и работоспособности разработанных в работе алгоритмов решения задач, автором проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, известными аналитическими решениями и опубликованными результатами других авторов.

Научная новизна

В представленной работе сформулирована математическая модель задачи о плоском и осесимметричном изотермическом и неизотермическом течении вязкой несжимаемой жидкости с учетом диссипативного разогрева, зависимости вязкости от температуры и наличия свободной поверхности, описывающая заполнение емкостей под давлением.

Разработан и реализован в виде программы алгоритм расчета гидродинамических, кинематических и тепловых характеристик исследуемого процесса, базирующийся на модифицированном конечно – разностном методе расчета течений вязкой жидкости со свободной поверхностью.

Получены результаты, демонстрирующие влияние вязкой диссипации на кинематические и динамические характеристики течений, формирование тепловых полей, деформацию и ориентацию элементов жидкой среды.

Для изотермических течений получены критериальные зависимости для характеристики свободной поверхности и длины зоны фонтанирующего течения от числа $W=Re/Fr$ – отношение гравитационных сил к вязким.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается строгостью используемых математических методов, непротиворечивостью результатов и выводов, их согласованностью с аналитическими решениями и результатами расчетов других авторов.

Основные результаты диссертации опубликованы в 11 печатных работах, 4 работы опубликованы в журналах, включенных в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы неоднократно обсуждались на различных конференциях и симпозиумах (опубликовано 6 работ) и получили одобрение известных специалистов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в создании математической модели, анализ которой способствует более точному пониманию процессов неизотермической гидродинамики потоков со свободной поверхностью. Работа поддержана рядом грантов РФФИ. Практическая значимость работы связана с востребованностью разработанных вычислительных методик и программного комплекса при выборе реального технологического регламента и конструировании технологического оборудования на ряде предприятий, что является несомненным достоинством работы.

Диссертационная работа изложена на 108 страницах. Список цитируемой литературы состоит из 137 наименований, включая 6 публикаций автора, одна из которых принята в печать.

Во введении дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы, описываются цели, задачи и методы исследования, приведен краткий итог работы и основные положения, выносимые на защиту.

Глава первая диссертационной работы посвящена описанию методов вычислительной гидродинамики, используемой при численном исследовании течений жидкостей со свободной границей. Подробный анализ опубликованных работ различных авторов, проведенный диссертантом, выявил достаточно сложные нерешенные к настоящему времени проблемы, связанные с фонтанирующими течениями. Это позволило конкретизировать задачи, стоящие перед автором, провести анализ известных методов и выбрать наиболее подходящий метод расчета формы свободной границы.

Вторая глава посвящена описанию алгоритма численного решения уравнений Навье–Стокса методом контрольных объемов на структурированной сетке. Описан стандартный неявный алгоритм для решения уравнений Навье–Стокса с использованием процедуры SIMPLE и известного метода инвариантов для расчета значений переменных на свободной поверхности. Температурное поле в исследуемой области определяется на основе уравнения теплопроводности с конвективными слагаемыми и источником членом, связанным с вязкой диссипацией.

Таким образом, приведенный в диссертационной работе алгоритм позволяет

перейти к моделированию процессов тепло– и массопереноса в геометрических областях, характерных для элементов технологического оборудования.

В третьей главе представлена математическая модель заполнения емкостей ньютоновской жидкостью, включающая уравнение движения, неразрывности и энергии с диссипативными источниками и зависимостью вязкости от температуры в размерном и безразмерном виде.

Приведена физическая постановка задачи, отвечающая заполнению плоского и цилиндрического канала и подробно описана реализация численного алгоритма решения сформулированной краевой задачи. Существенной частью описанного алгоритма является, по-моему мнению, расчет и визуализация дополнительных характеристик процесса – топограммы массораспределения и ориентации жидких элементов.

Тестирование методики расчета проводилось на решении неизотермической задачи течения жидкости в бесконечном плоском канале и круглой трубе с заданным расходом, что позволило выбрать сеточные параметры, обеспечивающие сходимость и требуемую точность получаемого решения.

Моделирование изотермического заполнения позволило получить параметрические зависимости параметра χ стационарной формы свободной поверхности от параметра W , а сравнение формы свободной поверхности с известными результатами свидетельствует о достоверности полученных результатов.

Результаты расчета характеристик заполнения в неизотермических условиях – форма свободной поверхности, распределение аксиальной и радиальной скорости и структура течения – качественно не противоречат ожидаемой картине течения, причем сравнение с известными теоретическими и экспериментальными данными для рассмотренных режимов заполнения оказывается вполне удовлетворительным.

Наибольший интерес представляет исследование влияния диссипативного разогрева как на стационарную форму свободной поверхности в зависимости от значений основных определяющих параметров исследуемого процесса, так и на поведение жидких элементов при заполнении пресс-формы.

В заключении приведено краткое описание основных результатов, выполненных

автором и приведенных в диссертации.

Замечания по диссертационной работе в целом

1. Учитывая, что существенная часть технологических процессов, включающих литьё под давлением, связана с переработкой полимерных материалов, которые проявляют при деформировании вязкоупругие (наследственные) свойства, в настоящей работе казалось бы должны присутствовать оценки характерных значений чисел Деборы (De) для нестационарных течений, чисел Вейссенберга (We) для стационарных и квазистационарных режимов деформирования и параметра упругости $El = We/Re$, которыми и определяются особенности поведения наследственных сред.
2. Сложная кинематическая картина деформационных и ориентационных процессов элементов жидкости, полученная в работе, также, видимо, требует оценок локальных значений характерных параметров исследуемой системы, определяющих её вязкоупругое поведение.
3. Небольшая неточность в оформлении списка литературы в автореферате (с.18) и диссертации (с.98 [31]).

Заключение

Работа базируется на достаточном числе исходных данных, примеров и расчетов. Она написана грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы.

Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты, а описанная методология и разработанный программный комплекс может использоваться на практике для оценки особенностей поведения текучих сред в достаточно сложных технологических устройствах.

Основные результаты работы опубликованы в статьях из списка ВАК и обсуждались на ряде международных и всероссийских конференций.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.05.

Диссертация **Фролова Олега Юрьевича** «Влияние вязкой диссипации на характеристики течения жидкости при заполнении емкостей» удовлетворяет требованиям ВАК и является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне, полученные результаты обладают определенной научной новизной и практической значимостью, а её автор заслуживает, по моему мнению, присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,
доктор физ.-мат. наук

Алтухов Юрий Александрович

14 ноября 2015 г.

ул. Юрина, дом 114-А, кв.104, Барнаул, Алтайский край, Россия, 656053
Тел. 89132249149, 8-3852-368363. yuri_altukhov@mail.ru
ФГБОУ ВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,
Барнаулский филиал Финуниверситета,
профессор кафедры «Математика и информатика».

Подпись Алтухова Ю.А. заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета филиала



Богданова М.М.