

Отзыв официального оппонента о диссертации
Тороповой Любови Валерьевны
«Математическое моделирование устойчивой моды дендритного роста
при различных условиях кристаллизации»
на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Начиная с основополагающих работ Иванцова, рост дендритов при кристаллизации однокомпонентных жидкостей теоретически исследован довольно детально. Для бинарных и, соответственно, многокомпонентных систем ситуация не столь ясная, хотя именно такие системы являются основой современных металлических материалов. В частности, теоретические исследования влияния конвекции на дендритный рост в таких системах пока находятся в стадии развития. Диссертация Л.В. Тороповой посвящена математическому моделированию устойчивого дендритного роста при различных кристаллических симметриях растущих дендритов и конвективном тепло- и массопереносе вблизи их поверхности, что, несомненно, является *актуальной* задачей.

В первой главе приведен обзор литературных источников, вводящий в курс решаемой проблемы. Здесь диссертант демонстрирует широкую эрудицию и умение работать с преимущественно переводной литературой. Начну сразу с критического замечания. *Этот обзор не носит характера целенаправленной подготовки к формулированию задач исследования. По своему объему он составляет около трети от общего объема диссертации и наряду с необходимой информацией сообщает читателю детальные сведения о методе электромагнитной левитации и температурно-временном цикле обработки экспериментальных образцов, которые могли бы быть лишь кратко упомянуты в связи с задачами диссертационного исследования.* Рецензенту представляется целесообразным включение в обзор работ, подводящих к формулировке начальных уравнений 2.3 и 2.4 последующей основной главы диссертации, поскольку появление их там выглядит совершенно не мотивированным, несмотря на то, что часть этих работ выполнена при участии диссертанта (например, [121]).

Основное содержание диссертации приводится *во второй главе*, посвященной математическому моделированию устойчивой моды дендритного роста при различных условиях кристаллизации. Здесь диссертант демонстрирует прекрасную теоретическую подготовку, умение ставить и самостоятельно решать нетривиальные задачи с использованием весьма изощренных математических методов. Все это позволяет сделать вывод об ее весьма основательной квалификации. В диссертации:

- решена система уравнений устойчивого роста дендритного кристалла в условиях вынужденной конвекции в бинарной системе, найдены распределения температуры, концентрации примеси, а также компонент скорости конвективного течения расплава;

- получены выражения для критериев отбора устойчивых мод роста дендритов (2.35) и (2.39), (2.63) и (2.70) для случаев термического и термохимического устойчивого роста параболического дендрита с симметрией n -ого порядка, которые подтверждают ключевую роль кинетики по сравнению с анизотропией поверхностной энергии для высокоскоростного дендритного роста (весьма важный результат для последующих работ); показано, что эти критерии могут быть объединены в единый критерий для решения термоконцентрационной задачи;

- показано, что дендритные кристаллы с большей симметрией роста развиваются быстрее, чем соответствующие кристаллы с меньшей симметрией.

Эти основные достижения диссертанта делают несомненным вывод о самостоятельной ценности проведенного ею теоретического анализа. Рецензенту не удалось найти погрешностей в его ходе, и эта строгость является характерной чертой всех работ, выполненных ранее под руководством Д.В. Александрова.

Естественным развитием работы является предпринятое *в третьей главе* сопоставление ее выводов с большим количеством расчетных и экспериментальных результатов, полученных другими авторами. В их числе - данные, полученные численным моделированием, а также экспериментальные данные по кинетике роста кристаллов в каплях, обрабатываемых в установках электромагнитной и электростатической левитации. Для сопоставления с теорией выбрана структура дендрита с гексагональной морфологией кристаллической решетки.

Сравнительный анализ показал, что данные по скорости роста и кривизне поверхности дендритов с неосесимметричной морфологией, полученные методом фазового поля, хорошо описываются теоретической моделью с резкой границей в двумерном случае, что позволяет применить теоретические выводы Л.В. Тороповой и для трехмерной геометрии роста кристаллов.

Представляет интерес проведенное в этой главе сравнение скорости роста вершины ледяного дендрита на Земле и в условиях микрогравитации на борту Международной космической станции. Здесь подтвержден вывод данной работы об увеличении скорости роста кристаллов вследствие конвекции и о возрастании теплового потока у межфазной границы.

Вызывает уважение тщательность сопоставления диссертантом выводов работы с данными, приведенными в данной главе. Л.В. Торопова не стремится приукрасить свои результаты, а объективно анализирует и объясняет причины их расхождения с экспериментом. Так на стр.85 ею проанализировано влияние конвективного потока на затвердевание сплава $Ti_{45}Al_{55}$. Отмечено, что модель с неподвижным расплавом не описывает данные эксперимента, а модель с кондуктивными граничными условиями и набегающим потоком со скоростью, представляющей верхний предел ламинарного течения, согласуется с нижним пределом измерений. Следовательно, причины указанных расхождений связаны с переходом от ламинарного режима течений в левитирующих каплях к турбулентному в верхней части растущего кристалла.

Таким образом, к защите представлена работа, в которой приведены результаты в должной степени самостоятельного исследования, выполненного диссертантом. Л.В. Торопова правильно представляет себе и **перспективы** дальнейшей разработки этой темы, и ее **практическую значимость**, в частности, для литейной и металлургической промышленности Российской Федерации, традиционно заинтересованной в развитии наукоемких технологий получения материалов со специальными свойствами. Математическое моделирование кристаллизации позволяет существенным образом оптимизировать изучаемые процессы, управлять ими и получать материалы с заданными расчетными характеристиками. Результаты диссертации **опубликованы** в 11 печатных работах, определенных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, получены 4 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Материалы диссертации успешно прошли апробацию на международных и российских конференциях.

Тема и содержание работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника. Полагаю, что по своему научному уровню, глубине и тщательности решения поставленной задачи диссертационная работа Л.В. Тороповой соответствует требованиям п.п. 9-11 Положения о присуждении учёных степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Торопова Любовь Валерьевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики, технологии и
методики обучения физике и технологии
Федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Уральский
государственный педагогический
университет»

Попель Петр Станиславович
«23» сентября 2020 г.

Адрес: 620017, г. Екатеринбург,
пр. Космонавтов, 26
Тел. (343) 371-46-56
E-mail: pspopel@mail.ru



Подпись Попеля П.С. заверяю

Верующий менеджер по персоналу:
И. А. Вертасьева