

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
теплофизики Уральского отделения РАН
кандидат физ.-мат. наук,



А.В. Виноградов

1 февраля 2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертацию Пильника Андрея Александровича «Кинетика кристаллизации и кавитации расплавов при больших отклонениях от равновесия», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

На отзыв представлены:

- диссертация, выполненная в ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе» СО РАН, г. Новосибирск, объемом 85 страниц, включая 28 рисунков и 2 таблицы и библиографический список из 127 наименований.
- автореферат на 24 страницах, в котором изложены основные положения диссертации и представлен список публикаций автора по теме работы.

Актуальность работы

Процессы тепломассопереноса, сопровождаемые фазовыми переходами, управляются термодинамическими и кинетическими факторами. Особенно сложным эти процессы становятся в многофазных средах при неравновесных условиях. Для экспериментального изучения требуется сложная аппаратура и большие затраты времени. Другим подходом к изучению таких процессов является математическое моделирование с использованием уравнений тепломассопереноса, термодинамики и кинетики фазовых переходов. При математическом моделировании приходится сталкиваться с большими трудностями, связанными с многообразием рассматриваемых процессов. Однако необходимость моделирования очевидна, т. к. полученные из теории знания уменьшают объём необходимых экспериментальных исследований и позволяют выбрать оптимальные условия для их реализации, а представление о сути рассматриваемых процессов даёт возможность непосредственного управления ими.

В диссертации дано обоснование актуальности работы, сформулированы ее цели, научная новизна, достоверность и практическое значение результатов, а также их апробация. Дан обзор литературы по тематике диссертации.

Анализ содержания диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность, формулируется цель и основные задачи диссертационного исследования, излагается научная новизна, фундаментальная и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** дан краткий обзор литературы по тематике диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию кинетики кристаллизации расплавов, быстро приведенных в переохлажденное состояние. Решается краевая задача, описывающая неравновесный механизм роста одиночного кристалла в переохлажденном расплаве. Рассматривается кинетика флуктуационного зародышеобразования и роста кристаллов. Строится теория суммарной кристаллизации переохлаждённого расплава с учётом тепловыделения в процессе фазового перехода.

В **третьей главе** исследуются механизмы кавитации расплавов в процессе их кристаллизации. Рассмотрен механизм образования пор при объемной кристаллизации расплава, обусловленный усадкой вещества при затвердевании. Решена задача о сегрегации растворенного в расплаве газа в процессе его кристаллизации, ведущей к формированию газовых пор. Рассмотрены три геометрии фронта кристаллизации: плоская, цилиндрическая и сферическая.

В **четвёртой главе** с привлечением развитых в работе представлений о кинетике фазовых превращений исследуется процесс дегазации высоковязкого газонасыщенного расплава при его быстрой декомпрессии. Исследуется как рост одиночного газового пузырька, так и кинетики нуклеации и роста ансамбля газовых пузырьков.

В **заключении** формулируются основные результаты, полученные в диссертации, к наиболее интересным из которых относятся следующие.

В диссертационной работе предложена неравновесная кинетическая модель роста сферического кристалла в переохлажденном расплаве, корректно учитывающая эффект прогрева расплава вблизи межфазной поверхности, а также эффект усадки вещества при затвердевании. Найдено новое аналитическое решение задачи для скорости роста кристалла, справедливое в широком диапазоне переохлаждений.

Найдены аналитические решения задачи о сегрегации растворенного в расплаве газа движущимися фронтами кристаллизации для трех геометрий фронта: плоской, цилиндрической и сферической. Показано, в каких случаях газовыделение в расплаве неизбежно, а в каких случаях его можно предотвратить. Представлена кинетическая

модель газовой выделения при объемной кристаллизации, связанной с усадкой вещества при затвердевании. Показана существенная зависимость конечного размера кристаллических зерен и кавитационных включений в затвердевшем материале от скорости охлаждения расплава.

Исследован механизм роста одиночного газового пузырька в высоковязком газонасыщенном расплаве при его быстрой декомпрессии. Найдено новое аналитическое решение задачи для скорости роста пузырька, хорошо описывающее данный процесс в широком диапазоне пересыщений и на всех его стадиях, включая неравновесную, учет которой крайне необходим, если рассматривать высоковязкие среды. Показано, что по прошествии определенного времени процесс становится автомодельным.

Представлена кинетическая модель нуклеации и роста газовых пузырьков в высоковязком газонасыщенном расплаве при его быстрой декомпрессии. Модель корректно учитывает изменение пересыщения среды путем подстановки в кинетические уравнения, описывающие процесс дегазации, реального распределения концентрации растворенного в жидкости газа, формирующегося вокруг растущих в результате диффузии пузырьков.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Выводы строго соответствуют полученным в работе теоретическим результатам. В целом они корректно сформулированы и адекватно отражают содержание диссертации.

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации

Автореферат правильно и полно отражает содержание и результаты диссертации.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенных методик численного и аналитического решений, совпадением полученных решений как качественно, так и во многих случаях количественно с экспериментальными данными, согласием полученных результатов в предельных случаях с известными и апробированными результатами других авторов.

Научная новизна работы заключается в том, что автором получен ряд новых аналитических решений задач, связанных с кристаллизацией и кавитацией расплавов. Разработаны новые модели рассматриваемых процессов.

Практическая значимость работы

Модельные представления о кинетике затвердевания переохлажденных расплавов могут служить основой прогнозирования в энергетике, металлургии, микроэлектронике, в

современных технологиях получения новых перспективных материалов, обладающих уникальными физико-химическими свойствами: аморфных, микро- и нанокристаллических и т. п. Результаты исследования кавитационных процессов в жидкостях могут быть использованы не только при моделировании природных явлений, но и в различного рода технологических процессах, связанных с переходными режимами работы энергетических установок при сбросе давления, химическими технологиями и т. д.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы для использования в организациях: ИТ СО РАН, ИТПМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИФПМ СО РАН, ИТ УрО РАН, ИМЕТ РАН, ОИВТ РАН, НГУ, МГУ, МГТУ, МЭИ и др.

Соответствие паспорту специальности

Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследований и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.04.14 — теплофизика и теоретическая теплотехника.

Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере отражены в опубликованных работах, в том числе 12 – в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, внесённых в Перечень журналов и изданий, утвержденных Высшей аттестационной комиссией.

Замечания по диссертационной работе

1. При изложении теории массовой кристаллизации А.Н. Колмогорова автор указывает, что данную теорию можно использовать лишь в качестве нулевого приближения. Решение Колмогорова является точным в пределах, оговоренных при выводе условий: бесконечно большая система, подобие форм роста, малые переохлаждения и кинетическая (т.е. зависящая только от переохлаждения) скорость роста кристалла. Полная кристаллизация такой системы требует бесконечного времени, и в ней всегда найдется бесконечно большая область без растущих кристаллов. Поэтому формулу Колмогорова нельзя применять для вычисления времени кристаллизации конечного объема расплава. В формуле Колмогорова математически строго учтены эффекты перекрытия зародышей, и она правильно описывает начальную стадию кристаллизации. Применяемые обычно приближения Джонсона и Мела или Аврами могут быть выведены из формулы Колмогорова. В частности, приближения начальной стадии кристаллизации достаточно для вывода условий аморфизации расплава. Указанные обстоятельства следует корректно учитывать при формулировке «альтернативных» теорий.

2. В диссертации при описании роста кристалла в переохлажденной жидкости используется сферическая аппроксимация формы растущего кристалла. Известно, что в кинетическом режиме сферический кристалл теряет устойчивость формы роста. Начинается дендритный рост. Возможность потери устойчивости роста сферического кристалла автором не учитывается.

Заключение

Отмеченные замечания не изменяют общее положительное впечатление от диссертационной работы А.А. Пильника. Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой. Автор диссертации проделан большой объем работы, сформулированная цель исследования достигнута, все поставленные задачи решены. Положения диссертации, выносимые на защиту, обоснованы, результаты достаточно полно представлены в публикациях автора, доложены на ряде международных и российских конференций.

По своей актуальности, научной новизне, объёму выполненных исследований и практической значимости полученных результатов представленная диссертационная работа «Кинетика кристаллизации и кавитации расплавов при больших отклонениях от равновесия» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Пильник Андрей Александрович достоин присуждения искомой степени по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Содержание диссертации обсуждено на семинаре лаборатории фазовых переходов и неравновесных процессов в Институте теплофизики УрО РАН 16.01.2019 (протокол №1).

Отзыв составил:

Коверда Владимир Петрович



доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН,
заведующий лабораторией фазовых переходов и неравновесных процессов ФГБУН
Институт теплофизики УрО РАН,
г. Екатеринбург
01.02.2019

тел. (343)26788804, e-mail: koverda@itp.uran.ru
620016, г. Екатеринбург,
ул. Амундсена, 107а,
Институт теплофизики УрО РАН