

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию ВИНОГРАДОВА Андрея Владимировича “ Неравновесные процессы распада метастабильных состояний при кипении и образовании газовых гидратов ”,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника**

Улучшение эффективности работы аппаратов тепломассообменного оборудования в энергетике и других отраслях техники предполагает рост удельных тепловых нагрузок. Кипение, представляющее стохастический процесс зарождения и роста паровых образований, характеризуется наличием неустойчивых метастабильных состояний вещества со взрывным типом их распада. Исследование закономерностей стохастических флуктуаций, развивающихся при различных видах кипения, и их динамики при приближении к критическим тепловым нагрузкам, а также при иных видах фазовых переходов, представляет научный и практический интерес. Тем самым проблема, которой посвящена диссертация А.В. Виноградова, безусловно, актуальна. Это также относится к рассматриваемой в диссертации проблеме искусственного создания устойчивых газовых гидратов.

Диссертация изложена на 270 страницах и включает введение, 7 глав основного текста, заключение, библиографический список из 327 наименований, сопровождается 127 рисунками. По теме диссертации имеется 36 публикаций в изданиях из списка ВАК.

Во введении выделены актуальность проблемы, цель и задачи работы, сформулированы научная новизна полученных результатов и положения, выносимые на защиту.

Основное содержание диссертации разбито на две части. В первой ее части исследуются стохастические свойства неравновесных переходов на границе жидкой и газовой (паровой) фаз, во второй части - образование устойчивых газовых гидратов при кристаллизации из аморфного состояния.

В главе 1.1 описываются флуктуационные процессы со спектром мощности, обратно пропорциональным частоте. Указывается их широкая распространенность в природе и технике, порождающая глубокий интерес к изучению. Отмечается обнаружение такого спектра при кипении азота на тонкопленочном нагревателе. Представлены известные теоретические модели этих процессов, отмечены имеющиеся в них недостатки.

Подробно рассматривается феноменологическая теория $1/f$ шума, разработанная на основе стохастических уравнений в Институте теплофизики УрО РАН. Показывается характерная инвариантность предложенной фликкерной модели к масштабным преобразованиям, а также

ее устойчивость к внешним гармоническим воздействиям. Выполнены численные решения уравнений модели для описания процессов в пространственно распределенных системах. Расчеты показали способность модели к выявлению самоорганизации диссипативной системы с формированием в процессе эволюции кластерных структур.

В главе 1.2 представлено исчерпывающее описание экспериментальных установок, средств измерения и методик экспериментов, используемых автором при изучении флуктуационных процессов при кипении воды на платиновом проволочном нагревателе и на поверхности капиллярно-пористой трубки; при кипении на горизонтальной поверхности капель воды, пентана и гексана; при акустической кавитации воды, глицерина и вакуумного масла. Для соотнесения изменений характеристик флуктуаций с перестройкой режимов кипения дополнительно применялась визуализация процессов. Экспериментально исследованы пульсации и функции распределения амплитуды сигналов, построены спектры мощности колебаний и выявлен их фликкерный вид вблизи границы перестройки режимов кипения и в переходном режиме кавитации. Отдельной заслугой диссертанта является установление связи между критическими значениями параметра формы спектра и параметра длительности крупномасштабных низкочастотных выбросов через скейлинговое соотношение. Показано, что акустическая кавитация жидкостей сопровождается образованием фрактальных структур, найдена их хаусдорфова размерность. Наблюдаемые в эксперименте структуры качественно согласуются с результатами численных расчетов, описанных в главе 1.1.

В главе 1.3 кратко изложены основные результаты экспериментального исследования спектров флуктуаций при горении жидкого топлива на фитиле и в цепи дугового разряда. Для обоих случаев показан фликкерный характер полученных спектров.

Глава 1.4 содержит результаты экспериментального исследования явления стохастического резонанса при переходном кипении в условиях периодического тепловыделения на нагревателе и воздействия внешнего шума. Автор отмечает, что в институте теплофизики УрО РАН эффект стохастического резонанса был теоретически обнаружен в системе стохастических уравнений, моделирующей взаимодействующие неравновесные фазовые переходы. Автор в этой главе успешно решает задачу экспериментального воспроизведения и анализа температур, частот и амплитуд резонансного отклика в кризисных режимах кипения. Отчетливо показывается, что при низких частотах периодического тепловыделения внешний шум может приводить к перемежаемости пузырькового и пленочного режимов кипения и росту амплитуды температурных пульсаций.

В главе 2.1 рассмотрены теоретические вопросы получения и последующей кристаллизации аморфного льда. Исследован тепловой режим роста центров кристаллизации малых размеров. Приводятся результаты экспериментального получения аморфного льда методом осаждения в вакууме молекулярных пучков на охлаждаемую низкотемпературную

подложку. Построена зависимость температуры кристаллизации аморфного водяного льда от скорости нагревания, с использованием которой рассчитаны параметры, характеризующие кинетику кристаллизации. Полученные результаты хорошо согласуются с выводами теории гомогенной нуклеации.

В главе 2.2 излагаются общие сведения о газовых гидратах и способах их получения в промышленных и лабораторных условиях. Ее можно рассматривать как введение к материалу последующего раздела диссертации.

В главе 2.3 представлены способ и техника получения газовых гидратов методом вакуумной конденсации молекулярных пучков воды и газа на низкотемпературную подложку. Экспериментально исследована динамика перехода твердых конденсатов из аморфного состояния в стекловидное и далее в кристаллическую фазу. Показано, что при лавинной кристаллизации молекулы газа остаются захваченными внутри кристаллической формы. Представлены данные по влиянию массового газосодержания и скорости нагрева образцов на температуру кристаллизации при получении гидратов метана, этана, пропана и диоксида углерода. Определены максимально достижимые величины массового газосодержания в исследуемых гидратах, полученных на основе примененного в работе метода. Важным свойством служит самоконсервация гидратов, обеспечивающая их сохранение при температурах выше равновесных температур диссоциации.

По материалу диссертации возникли следующие замечания.

1. Для получения характеристик спектральной мощности пульсаций в предкризисных режимах кипения использованы лабораторные методы диагностики, трудно применимые в реальных условиях работы кипящих аппаратов. Возможно, стоило дополнить измерительную аппаратуру достаточно широко развитыми и универсальными средствами акустической диагностики.

2. Полезно было пояснить, какая из динамических переменных в системе стохастических уравнений может соответствовать непосредственно измеряемым в экспериментах флуктуациям электрических или оптических сигналов.

3. Раздел 1.2.2 изложен весьма схематично без содержательного анализа особенностей кипения на капиллярно-пористой поверхности.

4. Недостаточно уделено внимания преимуществ предлагаемого метода получения газовых гидратов перед уже существующими методами.

5. Текст диссертации не лишен опечаток, порой содержательных:

а) в системе уравнений (1.10), (1.11) для коэффициентов температуропроводности и теплопроводности допущено одинаковое обозначение;

б) в левой части дифференциального уравнения (2.15) должна стоять производная первого порядка.

Сделанные замечания не снижают общей высокой оценки представленной работы, которая содержит широкий спектр новых экспериментальных результатов последовательного исследования

стохастических процессов фазового перехода при кипении и образовании газовых гидратов. Обоснованность полученных результатов доказывается применением комбинации достаточно тонких современных методов экспериментального исследования, сравнением получаемых данных с результатами других исследований, а также воспроизводимостью результатов экспериментов. Результаты, полученные диссертантом, представляют крупное достижение в развитии науки о закономерностях неравновесных процессов распада метастабильных состояний при фазовых переходах. В целом диссертация представляет законченную работу, которая по своей научной новизне и значимости соответствует требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям согласно п.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней. Ее автор, Виноградов А.В., заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент
д.т.н., доцент

Э.А.Таиров

Эмир Асгадович Таиров - главный научный сотрудник Отдела теплосиловых систем Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИСЭМ СО РАН).

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130

E-mail: tairov@isem.irk.ru

