



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Д.М. Маркович

«27» ноября 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени доктора физико-математических наук «Неравновесные процессы распада метастабильных состояний при кипении и образовании газовых гидратов» выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики Уральского отделения Российской академии наук (ИТФ УрО РАН).

В период подготовки диссертации с 1999 по 2018 гг. соискатель Виноградов Андрей Владимирович работал в лаборатории фазовых переходов и неравновесных процессов ИТФ УрО РАН с 2006 по 2013 г. в должности научного сотрудника, с 2013 г. по 2018 г. – в должности старшего научного сотрудника, с 2018 г. по настоящее время работает в должности директора ИТФ УрО РАН.

В 2002 г. окончил с отличием физический факультет Уральского государственного университета им. А.М. Горького по специальности «физика». В 2005 году защитил диссертацию «Динамика флуктуаций в кризисных и переходных режимах кипения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «теплофизика и теоретическая теплотехника». Диплом кандидата физико-математических наук КТ № 172525.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**.

Актуальность темы. Случайные экстремальные пульсации, возникающие в переходных и кризисных режимах теплопереноса, отрицательно влияют на устойчивую работу элементов энергетического оборудования. Поэтому актуальной проблемой является установление закономерностей возникновения и устойчивости таких пульсаций и разработка рекомендаций для их предотвращения.

В кризисных режимах теплопереноса, помимо пульсаций с $1/f$ спектром, при нестационарной периодической нагрузке могут возникнуть экстремальные пульсации. В этом случае в системе возможен стохастический резонансный отклик. Явление стохастического резонанса заключается в том, что отклик нелинейной системы на периодическое воздействие многократно усиливается при добавлении шумового сигнала. Проявления стохастического резонанса, как и флуктуации с $1/f$ спектром мощности, тесно связаны с явлением перемежаемости в сложных нелинейных системах. В кризисных режимах теплопереноса с фазовыми переходами возникновение стохастического резонансного отклика и пульсаций с $1/f$ спектром мощности означает возможность крупномасштабных экстремальных выбросов в системе. Поэтому исследование различных резонансных явлений в энергетических и силовых установках является актуальной задачей.

В сильно неравновесных условиях при распаде метастабильных состояний, помимо масштабно инвариантных пульсаций, могут возникать пространственные фрактальные

структуры. Фрактальные кластеры образуются при неравновесной кристаллизации воды из твердого аморфного состояния.

При нагревании неравновесных аморфных слоев возможна взрывная кристаллизация. Взрывная кристаллизация является примером макроскопического проявления флуктуаций в неравновесных системах. Как показали эксперименты, при кристаллизации глубоко переохлажденной твердой аморфной воды, насыщенной газом, могут образовываться газовые гидраты. В условиях глубокой метастабильности лавинообразное зарождение центров кристаллизации захватывает молекулы газа, поэтому не происходит их вытеснения движением фронта кристаллизации. Формированию гидрата способствует слабое химическое сродство гидратообразующего вещества, а также размеры и формы его молекул, соответствующие геометрии полостей образующегося клатратного каркаса.

Запасы природного газа в газогидратном состоянии во много раз превосходят запасы природного газа в других видах. Но, хотя, гидрат природного газа содержит огромные запасы энергии, его добыча является чрезвычайно сложной и практически не реализована. Наряду с этим гидраты рассматриваются в качестве своеобразных контейнеров для хранения и транспортировки газа в газогидратном состоянии. Важное место в решении прикладных задач, связанных с газовыми гидратами, занимают работы, направленные на предупреждение и ликвидацию техногенного гидратообразования в газодобывающем и газоперекачивающем оборудовании. Исследование способов получения и устойчивости газовых гидратов, в частности, гидратов компонентов природного газа и водорода, является актуальной проблемой энергетики.

Цель работы: Комплексное исследование динамики критических и переходных процессов тепломассопереноса при высокоинтенсивных фазовых превращениях, включающее в себя изучение кинетики распада сильно неравновесных метастабильных состояний аморфного льда.

Поставлены и решены следующие задачи:

- Создание комплекса экспериментальных установок для регистрации флуктуационных процессов в системах с неравновесными фазовыми переходами. Разработка способов измерений флуктуаций при кипении, кавитации, дуговом разряде, колебательных режимах горения.
- Экспериментальное исследование флуктуационных процессов в кризисных и переходных режимах кипения, ультразвуковой кавитации жидкостей различной вязкости, колебательных режимах горения, дуговом электрическом разряде.
- Экспериментальное обнаружение экстремальных пульсаций с расходящимися спектральными характеристиками (спектр мощности флуктуаций обратно пропорциональный частоте) в кризисных и переходных процессах тепломассопереноса с неравновесными фазовыми переходами.
- Экспериментальное определение сценариев перехода к флуктуационным процессам с низкочастотной расходимостью спектров мощности при неравновесных фазовых переходах. Определение соотношений между показателями степени частотной зависимости спектров мощности флуктуаций и длительностями низкочастотных выбросов.
- Экспериментальное обнаружение и исследование стохастического резонансного отклика в переходных режимах кипения при периодическом тепловыделении.
- Разработка и апробация нового метода получения гидратов компонентов природного газа при низкотемпературной конденсации молекулярных пучков.

- Исследование условий образования гидратов метана, этана, пропана, диоксида углерода, полученных низкотемпературной конденсацией молекулярных пучков.
- Исследование температурных интервалов устойчивости и условия разложения полученных гидратов.

Научная новизна основных положений, результатов и выводов, полученных в диссертации:

- Впервые определены спектральные характеристики флуктуационных процессов в процессах тепломассопереноса с интенсивными фазовыми переходами: при переходе от пузырькового к пленочному кипению на проволочном нагревателе, при акустической кавитации жидкостей, при кипении капель на горизонтальной греющей поверхности, при кипении на капиллярно пористой поверхности, в колебательных режимах горения и дуговом электрическом разряде.
- Установлено, что в переходных режимах спектры мощности флуктуаций изменяются обратно пропорционально частоте. Выявлена масштабная инвариантность $1/f$ флуктуаций. Впервые определены скейлинговые соотношения между показателями степени спектров мощности флуктуаций и длительностями низкочастотных выбросов в кризисных и переходных режимах кипения и при акустической кавитации жидкостей.
- Впервые экспериментально исследовано явление стохастического резонансного отклика в переходных режимах кипения воды при периодическом тепловыделении.
- При распаде сильно метастабильных конденсатов аморфного льда и компонентов природного газа получены гидраты с различной степенью заполнения клатратных полостей, исследованы температурные границы существования метастабильного состояния, влияние скорости нагревания на температуры стеклования и кристаллизации конденсатов, а также диссоциации газовых гидратов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

Полученные результаты развивают представления о случайных пульсациях в сложных статистических системах вдали от термодинамического равновесия. Низкочастотная расхожимость спектров мощности в исследованных системах свидетельствует о возможности крупномасштабных выбросов и говорит о необходимости проведения спектральной диагностики в процессах с развитой флуктуационной природой. Вероятность низкочастотных выбросов большой амплитуды необходимо учитывать при прогнозировании устойчивости различных режимов теплообмена.

Метод неравновесной конденсации молекулярных пучков для получения газовых гидратов является важным для разработки безопасных способов транспортировки и хранения природного газа и способов захоронения диоксида углерода. В перспективе метод может быть использован для получения гидрата водорода и решения проблем хранения и транспортировки водорода.

Степень достоверности научных результатов:

Достоверность результатов диссертационного исследования подтверждается современными методами исследования. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками. Результаты диссертационной работы в полном объеме опубликованы в рецензируемых российских и международных журналах и обсуждались на российских и международных конференциях.

На защиту выносятся:

- Результаты экспериментальных исследований экстремальных пульсаций в критических и переходных процессах тепломассопереноса с неравновесными фазовыми переходами: в кризисных и переходных режимах кипения, ультразвуковой кавитации, переходных режимах горения, дуговом электрическом разряде;
- Сценарии перехода к флуктуациям с низкочастотной расходимостью спектров мощности при неравновесных фазовых переходах; соотношения между показателями степени частотной зависимости спектров мощности флуктуаций и длительностями низкочастотных выбросов;
- Результаты исследования стохастического резонансного отклика в переходных режимах кипения воды при периодическом тепловыделении.
- Результаты экспериментальных исследований условий образования гидратов (метана, этана, пропана, диоксида углерода), при кристаллизации газонасыщенных слоев аморфного льда, полученных новым методом низкотемпературной конденсации молекулярных пучков.
- Результаты исследования существования и разложения полученных гидратов, результаты исследования кинетики кристаллизации газонасыщенного аморфного льда.

Личный вклад автора:

Научные результаты, включенные в диссертацию и выносимые на защиту, получены соискателем лично.

Диссертант принимал непосредственное участие в получении и обработке экспериментальных данных, проведении их анализа и интерпретации, а также формулировании выводов, послуживших основой для выводов диссертации.

Разработка экспериментальных стендов и установок, используемых для получения исходных данных, выполнена автором лично либо при непосредственном участии автора.

Постановка решаемых задач и подготовка основных публикаций проводилась как лично диссертантом, так и совместно с чл.-корр. РАН Ковердой В.П., д.ф.-м.н. Скоковым В.Н., д.ф.-м.н. Файзуллиным М.З.

Список работ автора по тематике диссертации, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Решетников А.В., Коверда В.П., Скоков В.Н., Виноградов А.В. $1/f$ шум в колебательных режимах горения // Доклады АН. 2000. Т. 374. Вып.4. С. 481 - 483.
2. Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Koverda V.P., Vinogradov A.V. Self -organized criticality and $1/f$ - noise at interacting nonequilibrium phase transitions // Physica A. 2001. V. 293. P. 1 - 12.
3. Скоков В.Н., Решетников А.В., Коверда В.П., Виноградов А.В. $1/f$ шум при взаимодействии фазовых переходов // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. Вып.2. С. 316 - 321.
4. Решетников А.В., Скоков В.Н., Коверда В. П., Скрипов В. П., Мажейко Н.А., Виноградов А.В. Фликкер-шум и самоорганизованная критичность в кризисных режимах кипения. // Прикладная механика и техническая физика. 2002.Т. 41. №1. С. 131-136.
5. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Mazheiko N.A., and Vinogradov A.V. $1/f$ noise and self-organized criticality in crisis regimes of heat and

- mass transfer // International Journal of Heat and Mass Transfer. May 2003.V. 46.N.10.P.1879-1883.
6. Скрипов В.П., Виноградов А.В., Скоков В.Н., Решетников А.В., Коверда В.П. Капля на горячей плите: появление $1/f$ – шума при переходе к сфероидальной форме // Журнал технической физики. 2003. Т.73. Вып.6. с.21-23.
 7. Коверда В.П., Решетников А.В., Скоков В.Н., Виноградов А.В. $1/f$ спектр при акустической кавитации // Письма в Журнал технической физики. 2004. Т.30. Вып.22. С.31-36.
 8. Reshetnikov A.V., Skripov V.P., Koverda V.P., Mazheiko N.A., Vinogradov A.V. Flicker-Noise in Superheated Liquid Jets // Heat Transfer Research, 2004, Volume 35, Issue 1&2, p80-88.
 9. Коверда В.П., Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В. Пульсации с $1/f$ спектром при акустической кавитации воды // Теплофизика высоких температур. 2005. Т.43. Вып.4. С.631-636.
 10. Коверда В.П., Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В. Самоорганизованная кричиность при акустической кавитации жидкостей // Доклады АН. 2005. Т.404.№5.
 11. Skokov V.N., Koverda V.P., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V. $1/f$ fluctuations under acoustic cavitation of liquids // Physica A. 2006. V. 364. p. 63-69.
 12. Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V., Begletsov V.N., Skokov V.N. and Koverda V.P. Boiling up of jets of superheated ethanol-water solutions // Journal of Engineering Thermophysics. 2007. V. 16. N. 4. p. 244-248.
 13. Скоков В.Н., Коверда В.П., Решетников А.В., Виноградов А.В. Спектры мощности флуктуаций при кавитации глицерина в ультразвуковом поле // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т.14. N.1. с.51-56.
 14. Скоков В.Н., Решетников А.В., Виноградов А.В., Коверда В.П. Динамика флуктуаций и $1/f$ спектры при акустической кавитации жидкостей // Акустический журнал. 2007. Т.53. Вып.2. С.168-173.
 15. Vinogradov A.V., Reshetnikov A.V., Skokov V.N., Koverda V.P. $1/f$ Fluctuations in Boiling Crisis // Heat Transfer Research, 2007, Volume 38, Issue 5, p.399-406.
 16. Vinogradov A.V. Spectral Characteristics of Fluctuations in Ultrasonic Cavitation of Water and Glycerin // Heat Transfer Research, 2008, Volume 39, Issue 6, p. 519-527.
 17. Pavlenko A.N., Koverda V.P., Skokov V.N., Reshetnikov A.V., Vinogradov A.V., Surtaev A.S. Dynamics of Transition Processes and Structure Formation in Critical Heat-Mass Exchange Modes during Liquid Boiling and Cavitation // Journal of Engineering Thermophysics, 2009, Vol. 18, No. 1, pp. 20–38.
 18. А.В. Виноградов. Флуктационные процессы со спектром мощности $1/f\alpha$ -вида при акустической кавитации воды //Тепловые процессы в технике. 2009. Т. 1. № 11. С. 483-487.
 19. В.Н. Скоков, В.П. Коверда, А.В. Виноградов, А.В. Решетников. Низкочастотные колебания интенсивности лазерного луча, прошедшего через систему кавитационных кластеров воды // Теплофизика и аэромеханика. 2010. том 17. № 1. с. 109-118.
 20. Скоков В.Н., Коверда В.П., Виноградов А.В., Решетников А.В. Низкочастотные пульсации с $1/f\alpha$ спектром мощности при кавитации воды. // Теплофизика высоких температур. 2010. том 48. № 5. с. 741–748.
 21. Решетников А.В., Мажейко Н.А., Виноградов А.В., Бусов К.А., Коверда В.П. Динамические характеристики вскипающих струй перегретых водных растворов // Теплоэнергетика 2010 № 8, с.69-73.
 22. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П. Стеклование и кристаллизация низкотемпературных аморфных конденсатов водно-пропановой смеси // Доклады АН. 2012. Т.442. №3. с.1-3.

23. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П. Формирование газового гидрата в низкотемпературных неравновесных конденсатах, полученных осаждением молекулярных пучков // Сборник научных статей Актуальные вопросы исследований систем месторождений углеводородов под ред. Григорьева Б.А. Москва. Газпром ВНИИГАЗ. 2012. с. 299-308.
24. Коверда В.П., Скоков В.Н., Виноградов А.В. Устойчивость низкочастотных пульсаций в переходных режимах теплообмена с фазовыми превращениями // Теплофизика высоких температур. 2013. Т.51. №3. с.471-476.
25. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П. Получение газовых гидратов неравновесной конденсацией молекулярных пучков // Письма в Журнал технической физики. 2013. Т.39. Вып.17. С.61-70.
26. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Koverda V.P. Formation of clathrate hydrates under crystallization of gas-saturated amorphous ice // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2013, v. 65, p.649-654.
27. Виноградов А.В., Скоков В.Н., Коверда В.П. Стохастический резонансный отклик в переходном режиме кипения при периодическом тепловыделении // Доклады АН. 2014. Т.458. №5. с.531-534.
28. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Скоков В.Н., Коверда В.П. Формирование газового гидрата при кристаллизации аморфного льда, насыщенного этаном. // Журнал физической химии. 2014. Т.88. №10. с. 1517–1522.
29. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П. Свойства газовых гидратов, полученных неравновесной конденсацией молекулярных пучков // Теплофизика высоких температур. 2014. Т.52. №6. с. 852–862.
30. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Коверда В.П. Получение гидратов углеводородов алканового ряда при кристаллизации аморфного льда, насыщенного газом. // Сборник научных статей Актуальные вопросы исследований систем месторождений углеводородов под ред. Григорьева Б.А. Москва. Газпром ВНИИГАЗ. 2014. с.
31. Skokov V.N., Koverda V.P., Vinogradov A.V., Reshetnikov A.V. Stochastic resonance at nonequilibrium phase transitions // Physica A. 2015. V. 430. p. 65-72.
32. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Koverda V.P. Hydrate formation in layers of gas-saturated amorphous ice // Chemical Engineering Science. 2015. V.130. p.135–143.
33. Скоков В.Н., Виноградов А.В., Решетников А.В., Коверда В.П. Стохастический резонанс в кризисном режиме кипения при периодическом тепловыделении // Теплофизика высоких температур. 2016. Т.54. №3. с. 366–370.
34. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Tomin A.S., Koverda V.P. Nonstationary nucleation (explosive crystallization) in layers of amorphous ice prepared by low-temperature condensation of supersonic molecular beams // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017, v. 108, p.1292-1296.
35. Файзуллин М.З., Виноградов А.В., Томин А.С., Коверда В.П. Нестационарная нуклеация в слоях аморфного льда в присутствии искусственно внесенных кристаллических центров // Доклады Академии наук, 2017, том 472, №6, с. 645-649.
36. Phase stability of low-temperature amorphous condensates of water and water-gas mixtures / M.Z. Faizullin et al. // Interfacial Phenomena and Heat Transfer. – 2017. – V. 5. – №2. – P. 143-151.
37. Faizullin M.Z., Vinogradov A.V., Tomin A.S., Koverda V.P. Kinetics of decay of highly non-equilibrium metastable states of gassaturated amorphous ice in the presence of artificially introduced crystal centers // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019, v. 143, p.1185-1192.
38. М. З. Файзуллин, А. В. Виноградов, А. С. Томин, В. П. Коверда, Исследование процессов конденсации и кристаллизации при образовании газовых гидратов в

Материалы диссертации полно изложены в работах, опубликованных соискателем.

Апробация работы:

Основные результаты диссертации были доложены на следующих российских и международных конференциях, симпозиумах, совещаниях и т.д.: Школа-семинар под руководством академика А.И. Леонтьева, г. С.-Петербург, 2001 г., г. Рыбинск, 2003 г., г. С.-Петербург, 2007 г., г. Жуковский, 2009 г., г. Звенигород, 2011 г. и 2015 г., г. Орехово-Зуево, 2013 г., VII-VIII Всероссийская конференция молодых ученых, г. Новосибирск, 2002, 2004 гг., Сибирский теплофизический семинар, г. Новосибирск, 2004, 2005, 2014 гг., 3-7 Российская национальная конференция по теплообмену, г. Москва, 2002, 2006, 2010, 2014, 2018 гг., Минский Международный форум по тепло- и массообмену, г. Минск, 2004, 2008, 2012 гг., Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследования нефтегазовых пластовых систем», г. Москва, 2016 г., Международная конференция «Фазовые превращения в углеводородных флюидах: теория и эксперимент», г. Москва, 2016 г., Всероссийская Школа-семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, г. Екатеринбург, 2008, 2009, 2015 гг., Российская конференция «Метастабильные состояния и флуктуационные явления», г. Екатеринбург, 2005, 2007, 2017 гг., Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ, г. Казань, 2014 г., Всероссийская научно-практическая конференция «Теоретические и практические аспекты исследований природных и искусственных газовых гидратов», г. Якутск, 2011 г.

Решение о рекомендации к защите.

Диссертация «Неравновесные процессы распада метастабильных состояний при кипении и образовании газовых гидратов» Виноградова Андрея Владимировича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «теплофизика и теоретическая теплотехника».

Заключение о принятии к защите принято на заседании общепланового семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством академика РАН Д.М. Марковича.

Присутствовало на заседании 37 человек, в том числе 3 академика РАН, 1 член-корреспондент РАН, 14 докторов наук, 15 кандидатов наук. Результаты голосования: “за” – 37 человек, “против” – 0 человек, “воздержались” – 0 человек. Протокол № 61/6–2019 от 27 ноября 2019 года.



Председатель семинара
Павленко Александр Николаевич,
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН.



Секретарь семинара
Мулладжанов Рустам Илхамович,
д.ф.-м.н., с.н.с. лаборатории физических
основ энергетических технологий ИТ СО
РАН.