

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01.25

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 04.06.2026 № 5

О присуждении Борисову Артему Константиновичу
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Термодинамика и кинетика размытых фазовых переходов в длинноцепочечных молекулярных кристаллах и полимерах» по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния» принята к защите 26 марта 2026 г., протокол № 1, диссертационным советом ФТИ 34.01.01.25 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 17 человек приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 02.01-02-153, прил. 1 от 15 июля 2025 г.

Соискатель Борисов Артем Константинович, дата рождения – 30 июня 1998 г., в 2021 году с отличием окончил программу магистратуры СПбПУ по направлению подготовки – 03.04.02 «физика».

В 2025 году окончил аспирантуру в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в процессе обучения сданы кандидатские экзамены по физике конденсированного состояния, истории и философии науки, иностранному языку (английскому).

В период подготовки диссертации работал в лаборатории физики прочности ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника этой же лаборатории.

Диссертация выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель:

Марихин Вячеслав Александрович, доктор физ. – мат. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики прочности ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Оппоненты:

Озерин Александр Никифорович, доктор хим. наук, чл.-корр. РАН, главный научный сотрудник Института синтетических полимерных

материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, предоставил на диссертацию положительный отзыв, содержащий 7 замечаний.

Орлова Татьяна Сергеевна, доктор физ. – мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории физики профилированных кристаллов ФТИ им. А.Ф. Иоффе, предоставила на диссертацию положительный отзыв, содержащий 3 замечания.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ) предоставила на диссертацию положительный отзыв, содержащий 4 вопроса.

Отзыв подготовил доктор физ.-мат. наук, советник директора Филиала НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ – ИВС Бронников Сергей Васильевич. Отзыв утвердил доктор физ.-мат. наук, заместитель директора по научной работе НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ Воронин Владимир Владимирович. Диссертационная работа обсуждена на заседании расширенного семинара лаборатории физической химии полимеров Филиала НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ – ИВС «21» апреля 2026 г, протокол № 1.

В заключении отзыва сказано:

Диссертационная работа представляет собой самостоятельное и законченное исследование, содержащее новые результаты в области физики фазовых переходов, в частности, полиморфных превращений длинноцепочечных молекулярных кристаллов.

Материал диссертации в полной мере отражен в опубликованных работах, а автореферат соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа Борисова Артема Константиновича «Термодинамика и кинетика размытых фазовых переходов в длинноцепочечных молекулярных кристаллах и полимерах» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор – Борисов Артем Константинович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. «Физика конденсированного состояния».

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученые степени доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой

выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ ведет активные исследования в области естественных наук, в частности в области высокомолекулярных соединений. Кроме того, в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ действует диссертационный совет по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Основное содержание диссертации представлено в 14 работах, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

1. Borisov A. K., Egorov V. M., Marikhin V. A. An investigation of the thermodynamic properties of molecular crystals by the differential scanning calorimetry // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1236. – Art. 012010.
2. Borisov A. K., Egorov V. M., Marikhin V. A. An investigation of the thermodynamic properties of long-chain molecular crystals and the possibility of their application as phase change materials // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1400. – Art. 055020.
3. Егоров В.М., Марихин В.А., Мясникова Л.П., Борисов А.К., Иванькова Е.М., Иванчев С.С. Тепловой эффект перехода моноклинной фазы в орторомбическую в сверхвысокомолекулярном полиэтилене // *Физика твердого тела*. – 2019. – Т. 61, № 10. – С. 1965–1970.
4. Егоров В.М., Борисов А.К., Марихин В.А. Энергоемкость РСМ-материалов на основе n-алканов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2019. – Т. 45, № 23. – С. 38-42.
5. Borisov A. K., Egorov V. M., Marikhin V. A. Investigation of the influence of the nano-nuclei habit on the specifics of phase transitions in long-chain molecular crystals and polymers // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1697. – Art. 012102.
6. Егоров В.М., Борисов А.К., Марихин В.А. Анализ процесса образования нанозародышей при структурном фазовом переходе в молекулярных кристаллах нормальных алканов // *Физика твердого тела*. – 2021. – Т. 63, № 3. – С. 406-412.
7. Borisov A. K., Egorov V. M., Marikhin V. A., Myasnikova L. P. Thermal conductivity of PCM materials based on a composite consisting of n-alkane and nanoscale additives // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 2103. – Art. 012094.

8. Егоров В.М., Борисов А.К., Марихин В.А. Теплопроводность композита на основе n-алкана и наноразмерных добавок // Письма в Журнал технической физики. – 2022. – Т. 48, № 2. – С. 7-10.
9. Борисов А.К., Марихин В.А., Егоров В.М. Динамика фазовых переходов в гомологическом ряду N-алканов разной четности // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 43–48.
- A10. Борисов А.К., Марихин В.А., Егоров В.М. Эффект четности --- симметрии молекул n-алканов // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66, № 5. – С. 752–757.
11. Борисов А.К., Гурьева С.А., Егоров В.М., Марихин В.А. Гетерогенная природа многостадийных твердофазных переходов в четных нормальных алканах – триаконтане, дотриаконтане и гексатриаконтане // Физика твердого тела. – 2024. – Т. 66, № 10. – С. 1810–1819.
12. Гурьева С.А., Борисов А.К., Марихин В.А., Байдакова М.В., Куликова Е.С., Дороватовский П.В. Кинетика полиморфных превращений трикозана n-C₂₃H₄₈ при нагревании // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67, № 4. – С. 711–723.
13. Борисов А.К., Гурьева С.А., Марихин В.А. Ротационные фазы при нагревании нечетных нормальных алканов — генейкозана, трикозана и пентакозана // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67, № 9. – С. 1706-1711.
14. Борисов А.К., Гурьева С.А., Марихин В.А. Влияние скорости нагрева на развитие фазовых переходов в материалах с изменяемым фазовым состоянием // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67, № 11. – С. 2136-2144.

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв Аверкиева Никиты Сергеевича, доктора физ.-мат. наук, заведующего сектором теории оптических и электрических явления в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе положительный, содержит 1 вопрос:

- В первом и четвертом положениях, выносимых на защиту, упоминаются объекты нанометрового размера. Однако, далее нигде оценки размеров не приведены и в случае четвертого положения неясно, почему нанометровые частицы металла очень сильно изменяют теплопроводность n-алкана.

2. Отзыв Кукушкина Сергея Арсеньевича, доктора физ.-мат. наук, заведующего лабораторией структурных и фазовых превращений в конденсированных средах ИПМаш РАН замечаний не содержит.

3. Отзыв Пахомова Павла Михайловича, доктора хим. наук, заведующего кафедрой физической химии ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» положительный, содержит 1 рекомендательное замечание:

- Поскольку в работе исследуются не только термодинамические свойства образцов, но и их структурные характеристики, то желательно в дальнейшем подключить к исследованию такие прямые методы, как рентгеноструктурный анализ и ИК спектроскопия.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по исследованию размытых фазовых переходов в длинноцепочечных молекулярных кристаллах и полимерах были получены следующие основные результаты:

- Установлена гетерогенная природа размытых твердофазных переходов первого рода в *n*-алканах, связанная с образованием нанозародышей новой фазы в объеме предшествующей и дальнейшим развитием перехода путем последовательных присоединений нанозародышей на возникшую межфазную границу.
- В гомологическом ряду *n*-алканов выявлен эффект четности, обусловленный симметрией индивидуальных молекул. Эффект заключается в различном поведении одновременно нескольких параметров, таких как температуры фазовых переходов первого рода, величины температурного гистерезиса ФП-1 и размеры элементарных объемов превращения гетерогенного ФП-1. Таким образом, эффект четности проявляется не только в различии обычно наблюдаемых макроскопических параметров ФП-1, но и на наноуровне, в особенностях структурных превращений молекулярной упаковки *n*-алканов.
- Установлен многоступенчатый процесс развития твердофазного превращения и выявлен ряд промежуточных кристаллических и ротационных фаз в генейкозане (C₂₁H₄₄) и трикозане (C₂₃H₄₈). Впервые выявлено наличие в генейкозане орторомбической фазы *O_{dci}*, моноклинной фазы *M_{dci}* и ротационной моноклинной фазы *R_V*, а в трикозане впервые выявлена промежуточная моноклинная фаза *M_{dci}*, которые не удается зарегистрировать классическими структурными методами, ввиду непосредственной близости по энергиям активации.
- Выявлен общий механизм фазовых трансформаций в гомологах *n*-алканов с увеличенной длиной метиленовых последовательностей, имеющих исходную моноклинную симметрию кристаллической ячейки, – триаконтане (C₃₀H₆₂), дотриаконтане (C₃₂H₆₆) и гексатриаконтане (C₃₆H₇₄). Впервые установлено, что в рассматриваемых гомологах переход из низкотемпературной моноклинной *M_L* в ротационную триклинную *R_{III}* фазу должен осуществляться последовательно через две промежуточные фазы – орторомбическую *O* и высокотемпературную моноклинную *M_H*. Кроме того, такой механизм можно предположить единым во всех *n*-алканах с исходной моноклинной *M_L* фазой, претерпевающий переход в ротационную *R_{III}* фазу.

- Обнаружена существенная зависимость термодинамических параметров фазовых переходов от скорости нагрева (температурных интервалов, значений энтальпии и теплоемкости). Впервые установлено, что малые скорости приводят к сдвигу температур, связанных с началом фазовых переходов, в сторону больших значений, а высокие скорости, наоборот, приводят к сдвигу температур в сторону меньших значений. Оказалось, что изменение скорости нагрева оказывает существенное влияние и на кинетику развития фазовых переходов. Установлено, что увеличение скорости нагрева приводит к развитию твердофазного перехода путем образования более мелких зародышей новой фазы.
- Обнаружено, что за счет модификации надмолекулярной структуры n-алкана при введении дополнительных центров кристаллизации можно многократно увеличить коэффициент теплопроводности. Разработаны композиты на основе нонадекана ($C_{19}H_{40}$) и наноразмерных порошков Al, отличающиеся увеличенным в 4.25 раза коэффициентом теплопроводности. Показано, что благодаря высокой энергоэффективности n-алканы находят широкое применение в качестве материалов с изменяющейся фазой.
- Установлено гетерогенное развитие твердофазного перехода из нестабильной моноклинной фазы в термодинамически устойчивую орторомбическую фазу в сверхвысокомолекулярном полиэтилене. Применение методов, развитых для анализа твердофазных переходов в n-алканах, позволило определить возможные области существования исходной моноклинной фазы в надмолекулярной структуре полиэтилена. В реакторном порошке СВМПЭ возможно существование моноклинной фазы в виде наномостиков, соединяющих между собой от 2-х до 4-х отдельных ламелей, или внутри микрофибрилл.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Установленная полная последовательность полиморфных модификаций генейкозана ($C_{21}H_{44}$) и трикозана ($C_{23}H_{48}$), а также выявленная кинетика фазовых превращений позволили заполнить имеющиеся в литературе пробелы и разрешить ряд противоречий относительно проявления тех или иных кристаллических и ротационных фаз в рассматриваемых гомологах n-алканов. Разработанные композиты на основе нонадекана ($C_{19}H_{40}$) и наноразмерных порошков Al, отличающиеся увеличенным в 4.25 раза коэффициентом теплопроводности, позволили выявить существенное влияние введения нанодобавок на надмолекулярную структуру n-алкана. Практическая значимость работы заключается в важности полученных результатов для понимания перспектив применения n-алканов в активно развивающейся области «зеленой» энергетики – материалах с изменяющейся фазой

(Phase Change Materials), для обеспечения комфортных условий жизнедеятельности людей и функционирования оборудования в экстремальных условиях южных и северных широт. Применение методов, развитых для анализа твердофазных переходов в *n*-алканах, позволило определить в сверхвысокомолекулярном полиэтилене (СВМПЭ) возможные области существования исходной моноклинной фазы в надмолекулярной структуре. Полученные результаты позволяют научно обоснованно выбирать наиболее подходящие образцы СВМПЭ для последующего метода твердофазной переработки, а также корректировать температурные и силовые режимы переработки с учетом морфологии исходной структуры.

Высокая степень достоверности результатов обеспечивается их согласием с представлениями о фазовых превращениях в ДМК, изложенными в литературе. Достоверность полученных результатов также обусловлена использованием современного высокоточного оборудования и воспроизводимостью на аналогичных образцах и установках.

Обоснованность сформулированных выводов подтверждается использованием специально разработанных методов, позволяющих повысить точность измеряемых теплофизических характеристик, а также применением теоретических подходов, известных в литературе.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Твердофазный переход в *n*-алканах является структурным размытым фазовым переходом первого рода, сопровождается изменением симметрии кристаллической упаковки молекул и развивается по гетерогенному механизму путем образования нанометровых зародышей новой фазы в объеме предшествующей.

2. В гомологическом ряду *n*-алканов эффект четности, связанный с различием в симметрии молекул, проявляется как в специфике поведения термодинамических параметров фазовых переходов первого рода, так и в особенностях структурной реорганизации *n*-алканов на наноуровне.

3. В нечетных *n*-алканах (C₂₁H₄₄, C₂₃H₄₈ и C₂₅H₅₂) твердофазный переход из исходной кристаллической орторомбической фазы O_i в ротационную моноклинную RV происходит единым образом через две промежуточные кристаллические фазы: орторомбическую O_{dc}i и моноклинную M_{dc}i. В четных *n*-алканах (C₃₀H₆₂, C₃₂H₆₆ и C₃₆H₇₄) твердофазный переход из исходной кристаллической низкотемпературной моноклинной фазы ML в ротационную триклинную фазу RIII осуществляется последовательно через две промежуточные

кристаллические фазы – орторомбическую О и высокотемпературную моноклинную МН.

4. Модификация надмолекулярной структуры n-алкана за счет введения дополнительных центров кристаллизации в виде наноразмерных частиц металла приводит к многократному увеличению коэффициента теплопроводности, что существенно повышает энергоэффективность n-алканов при их применении в качестве материалов с изменяющейся фазой.

Личный вклад соискателя состоит в проведении всех исследований методом дифференциальной сканирующей калориметрии, включая подготовку многочисленных образцов и постановку экспериментов. Обработка полученных термограмм с применением теории размытых фазовых переходов и анализ полученных результатов также проводились лично соискателем. Кроме того, соискателем были лично разработаны композиты на основе n-алканов, показавшие многократное увеличение коэффициента теплопроводности. Защищаемые результаты диссертационной работы получены соискателем лично. Вклад автора в анализ полученных экспериментальных результатов и оформление публикаций является определяющим.

Автор принимал активное участие в подготовке докладов по результатам работы и лично представлял их на научных конференциях и семинарах.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 16 докторов наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 17 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

На заседании 4 июня 2026 года диссертационный совет принял решение присудить Борисову Артему Константиновичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Ю.Г. Кусраев

Ученый секретарь

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

М.А. Семина

4 июня 2026 г.