На правах рукописи

ТЕРЕНТЬЕВ Павел Сергеевич

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РОСТА МОРФОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ СТРУКТУР

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2014

Работа выполнена на кафедре технической физики ФГАОУ ВПО "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина".

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор **Селезнев Владимир Дмитриевич**

Научный консультант: доктор физико-математических наук **Мартюшев Леонид Михайлович**

Официальные оппоненты: **Попель Петр Станиславович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Уральский государственный педагогический университет», профессор кафедры физики и математического моделирования

Бродова Ирина Григорьевна, доктор технических наук, профессор, ФГБУН «Институт физики металлов» УрО РАН, главный научный сотрудник лаборатории цветных металлов

Ведущая организация: **ФГБУН «Институт теплофизики» УрО РАН**

Защита состоится «26» декабря 2014 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета **Д 212.285.02** на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: г. Екатеринбург, ул. Мира 19, ауд. I (зал заседания Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», http://dissovet.science.urfu.ru/news2/

Автореферат разослан «____»_____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета _____ Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Неравновесные процессы в природе часто сопровождаются образованием пространственно-временных структур, фазовый состав которых отличен от окружающей среды. Трещина в твердом теле, снежинка в облаке, разряд молнии, растущее дерево – вот лишь некоторые примеры. Возникновение и развитие подобных структур сопровождается сложнейшими процессами по переносу и диссипации энергии, импульса, массы, как на фазовой границе структуры, так и во всем объеме. Происходящие процессы затрагивают большой диапазон пространственных и временных масштабов, а также сопровождаются разнообразными обратными связями. Все это обычно приводит к нелинейной кинетике развития структуры и ее сложной морфологии, причем первое и второе являются взаимосвязанными. Как следствие, изучение подобных систем, иногда называемых самоорганизующимися, является очень сложным и чрезвычайно многообразным.

Особой ценностью при фундаментальных исследованиях является не перечисление и изучение специфических свойств у конкретных самоорганизующихся систем, а поиск общих закономерностей, присущих структурообразованию в целом. В качестве таких закономерностей могли бы выступать величины, остающиеся инвариантными при росте у отличающихся по своей природе структур (или их частей).

Подобные закономерности можно искать на основе различных физических характеристик процесса. В настоящей работе их выбрано две: масса (объем, площадь) возникающей структуры и время её роста. Такой выбор сделан по следующим причинам: 1) эти величины можно ввести для любой возникающей в среде структуры, имеющей фазовую границу, и их практически всегда можно определять экспериментально; 2) эти величины являются основными для характеристики как морфологии, так и кинетики роста; 3) производная от массы по времени непосредственно связана с производством энтропии, являющимся, как хорошо известно, важнейшей характеристикой любого неравновесного процесса.

Отметим, что исследованию массы от времени при структурообразовании в различных физико-химических системах посвящено огромное число работ. Однако анализ литературы показывает, что попыток нахождения на ее основе универсальных (инвариантных) величин, ранее не проводилось. Интересно отметить, что попытки движения в данном направлении имеют место при изучении биологического структурообразования. В настоящей диссертации эти работы анализируются и существенно обобщаются.

Данная диссертационная работа в большей своей части является экспериментальным исследованием. В связи с этим, важнейшим вопросом являлся для нас выбор объекта исследования. Исходя из изложенного выше, в принципе, любая структурообразующая система с фазовой границей может быть взята за основу исследования. Мы остановили свой выбор на дендритной кристаллизации из раствора. Это связано со следующими причинами: 1) дендритная кристаллизация является одним из простейших и очень

распространенным примером структурообразования в природе, который сравнительно хорошо изучен; 2) временные и пространственные масштабы процессов, происходящих при подобной кристаллизации, позволяют использовать простейшее оборудование и методы; 3) оптические характеристики объекта позволяют напрямую (а не косвенно) наблюдать и измерять как весь дендрит, так и любую его часть.

Цель настоящей работы: поиск общих закономерностей, связанных с изменением массы со временем при образовании структур с фазовой границей в неравновесных условиях на основе экспериментальных данных.

В рамках этой цели решались следующие задачи:

1. Формулировка термодинамических предпосылок, указывающих на возможность существования инвариантных величин, связанных с массой при неравновесном росте кристаллов; формулировка модели, описывающей кристаллический рост.

2. Постановка и проведение эксперимента по неравновесной нестационарной кристаллизации из водного пересыщенного раствора. Написание программного модуля по обработке видеоизображений, полученных в опыте.

3. Анализ экспериментальных данных, проверка применимости модели для их описания.

4. Поиск и отбор достоверных экспериментальных зависимостей в литературе, определяющих рост неравновесных систем, отличных от кристаллических, их количественный анализ и сравнение с кинетикой роста кристаллических структур.

Научная новизна:

1. Впервые измерена зависимость массы (m) от времени (t) у отдельных квазидвумерных кристаллов хлористого аммония и их частей, нестационарно растущих в пересыщенном водном растворе и имеющих сложную нерегулярную границу фаз.

2. На основании результатов измерений и их анализа предложена единая простая двухпараметрическая модель (DS–модель) для описания зависимости удельного изменения площади (массы) дендрита или его ветвей от времени ($m'(t)/m(t)$). Впервые показано, что $m'(t)/m(t)$ меняется по степенному закону , где коэффициент a имеет универсальный характер для различных исследованных структур, а коэффициент b определяется продолжительностью их нестационарного роста. Проведено сравнение предсказательных возможностей DS-модели и традиционных зависимостей.

3. Впервые обнаружено, что нормировка найденного степенного закона на полное время нестационарного роста структуры t^* и её массу $m(t^*)$, позволяет получить универсальный закон, описывающий удельный прирост массы со временем. Универсальность выполняется как для одновременно растущих кристаллических структур NH_4Cl, так и для структур, растущих в разных временных диапазонах и при отличающихся начальных пересыщениях раствора.

4. Показана возможность количественного описания с помощью DS-модели изменения массы от времени у растущих живых организмов разных видов и обнаружена связь DS-модели с моделью Шмальгаузена. Для растущих из

раствора кристаллов и для живых организмов параметр модели a имеет близкие значения. Для частного случая показана согласованность DS-модели с принципом онтогенетической аллометрии, это является дополнительным доводом для применения DS-модели к описанию кинетики роста живых организмов.

Практическая значимость. Результаты диссертационной работы, связанные с кинетикой кристаллического роста могут найти применение в технологиях, связанных с неравновесным затвердеванием, в частности, в металлургии. Результаты, полученные при исследовании изменения массы живых организмов от времени роста, могут оказаться важными для экономико-хозяйственных расчетов и прогнозов в сельском хозяйстве и при решении природоохранных задач.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В замкнутой системе для сосуществующих кристаллов хлористого аммония (или их частей), неравновесно формирующихся в перенасыщенном водном растворе, удельный прирост массы в каждый момент времени совпадает.

2. Степенная зависимость $a/t\text{-}b$ (DS-модель) описывает удельный прирост массы от времени кристаллов хлористого аммония (или их частей) и ряда исследованных живых организмов не хуже ранее существующих эмпирических моделей, при этом она является существенно более простой и более теоретически обоснованной.

3. Для исследованных кристаллических структур значение параметра a DS-модели равно 1.8±0.1 и не зависит от пересыщения, морфологии кристалла, его изучаемой части (ветвь или их совокупность) и стадии роста, при этом оно попадает в интервал значений, полученных при исследовании с помощью DS-модели живых организмов.

Личный вклад автора. Постановка задачи и определение направлений исследований выполнены совместно с научным руководителем и консультантом. Проведение эксперимента по кристаллизации из водного раствора выполнено совместно с научным консультантом. Разработка алгоритма сегментации экспериментальных снимков, создание на его основе программного модуля для автоматической обработки экспериментальных данных, а также сама обработка выполнены лично соискателем. Анализ результатов эксперимента и подготовка материалов для публикации в журналах проведены совместно с руководителем и научным консультантом.

Апробация работы. Результаты исследования были представлены и обсуждены на Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-17, г.Екатеринбург, 2011); Twenty-third conference on Crystal Growth and Epitaxy (USA, 2012); Конференция стран СНГ по росту кристаллов (г. Харьков, 2012); Девятые Курдюмовские чтения. Синергетика в общественных и естественных науках(г. Тверь, 2013); Международная конференция молодых ученых (г. Пущино, 2013); The 19th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy(USA, 2013); I Международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института (г. Екатеринбург, 2014).

Публикации. Результаты исследования изложены в 2 статьях в рецензируемых журналах (входящих в список ВАК), в статье в сборнике трудов и 7 тезисах докладов конференций, получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем работы – 102 страницы, в том числе 35 рисунков, 5 таблиц, список литературы содержит 121 источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы актуальность темы, цель диссертационной работы, научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор литературных данных, посвященных изучению изменения массы и морфологии при массовой кристаллизации и при кристаллизации индивидуального дендрита, а также росту живых организмов. Выполнен обзор классических зависимостей, используемых для описания изменения массы m кристаллов и живых организмов в процессе их роста: Вейбулла (Колмогорова-Аврами) $m(t)=m_\infty[1+\exp(-Kt^a)]$; логистическая $m(t)=m_\infty/[1+a\cdot\exp(-Kt)]$; Гомпертца $m(t)=m_\infty\cdot\exp[-a\cdot\exp(-Kt)]$; Шмальгаузена $m(t)=Kt^a$; Берталанфи $m(t)=[a-(a-m_0^{1/p})\cdot\exp(-Kt/p)]^p$. Здесь t – время роста, m_∞ – максимальная масса, достигаемая в результате роста, m_0 – масса в начальный момент времени, a, K, p – эмпирические коэффициенты.

В главе сделаны следующие выводы:

1. Изучение роста единичного дендрита сосредоточено лишь на исследовании формы первичной вершины и скорости ее роста, а также месте появления вторичных ветвей относительно нее при стационарном росте. Полученные результаты имеют большое значение для развития и проверки существующих теоретических моделей роста, рассматривающих дендрит как параболоид. Проблема изучения кинетических особенностей роста реальной морфологически сложной структуры дендрита (как целиком, так и её частей) остаётся в этом случае практически не изученной.

2. Широкое исследование массовой кристаллизации (как экспериментальное, так и теоретическое, в том числе с помощью модели Колмогорова-Аврами) позволяет понять нестационарную кинетику роста (массу от времени кристаллов с момента возникновения до окончания роста) у множества одновременно растущих дендритов. Более того, данный подход применим при рассмотрении нестационарного роста отдельно взятого дендрита целиком. Однако в этом случае полностью исключаются из рассмотрения особенности кинетики роста отдельных боковых ветвей дендрита. Как следствие, выявление связей кинетики их роста с кинетикой роста кристалла как целого оказывается невозможным. В литературе не было обнаружено готовых экспериментальных данных, пользуясь которыми можно было бы определить подобные связи.

3. Выделены общие черты у растущих кристаллов и живых организмов. Несмотря на их существенное отличие, рост происходит по причине разности

химических потенциалов образующейся фазы и поступающего извне ресурса, в обоих случаях имеется теплосброс и присутствует фактор конкуренции за ростовый ресурс. Большинство существующих биологических моделей роста носят частный полуэмпирический характер и не учитывают время остановки роста организма. При этом в биологической литературе по росту живых организмов отмечена масштабная инвариантность кинетики роста организма в целом и его органов. Это является дополнительным поводом для проверки соотношения кинетики роста целого дендрита и его ветвей.

Вторая глава посвящена описанию проведенного эксперимента, а также методам обработки экспериментальных данных и получению зависимостей массы от времени свободно растущих кристаллов.

В качестве исследуемой системы использовался водный раствор хлорида аммония (NH_4Cl) насыщенный при температуре 35^0C. Раствор помещался между двух стеклянных пластин на предметном столике микроскопа BIOLAR PI при температуре ниже температуры насыщения. Поскольку зазор между пластинами был не более 0.05 мм, а диффузионная длина была около $2D/v \approx 0.5$ мм, где v, D - скорость роста и коэффициент диффузии дендрита, соответственно, то приготовленную систему можно рассматривать как квазидвумерную. Наблюдение и видеозапись производились лишь на одиночных свободно растущих кристаллах. Запись осуществлялась на цифровую видеокамеру при увеличении 100х. Всего было проведено 32 опыта, при этом длительность роста каждого кристалла была порядка нескольких минут. В подавляющем большинстве случаев (29) наблюдался рост дендритов с вторичными ветвями, в остальных – так называемые водорослеобразные структуры.

Видеозаписи, показывающие рост кристаллов, фрагментировались на отдельные кадры с частотой не менее 1 кадр/с. Квазидвумерное условие кристаллизации в тонком капилляре позволяет по измерению площади S, занимаемой кристаллом на фрагментированных кадрах судить о его массе m. Для определения площади каждый кадр необходимо было разделить на области, принадлежащие кристаллу и раствору (сегментировать изображение).

Видеозапись, соответствующая росту одного кристалла, представляла несколько сотен кадров, вследствие чего возникала необходимость автоматизации расчета площади. Важным звеном автоматизации был выбор алгоритма сегментации кадров, который должен учитывать следующие особенности отснятых видеозаписей: по мере роста кристалла освещенность кадров изменялась от темного к более светлому; контраст границы кристалла и раствора на некоторых участках был меньше, нежели для основной части контура.

Рассмотрено несколько алгоритмов сегментации, из которых выбран тот, который давал наименьшую погрешность и наибольшую согласованность с экспертной оценкой. Этот метод предполагает выделение диапазона на яркостной гистограмме кадра, который соответствует яркостям пикселей границы кристалла. Пикселям кадра, яркости которых в интервал не попадают, присваиваются его граничные значения; яркости пикселей, попадающие в выбранный диапазон, преобразуются по степенному закону вида $[A_{вых},B_{вых}]= k[A_{вх},B_{вх}]^{\gamma}$ (гамма-коррекция), где $[A_{вх},B_{вх}]$ – преобразуемый диапазон яркостей, $[A_{вых},B_{вых}]$ – результат

преобразования, k – коэффициент пропорциональности, γ – параметр, определяющий смещение яркостей исходного диапазона. Результат такого преобразования показан на Рисунке 1(a,b).

Для массива кадров, отображающих рост одной структуры, значения границ $[A_{вх},B_{вх}]$ и $[A_{вых},B_{вых}]$ определялись экспертом на основании анализа трех кадров, полученных в начале, в середине и в конце роста. Полученные экспериментальные кадры обрабатывались со значениями γ больше 1. Применение этой методики позволяет сгладить шумы и получить более однородный контраст фона и границы. После этого пороговой фильтрацией извлекается замкнутый контур объекта и выполняется конвертация в бинарный вид, показанная на Рисунке 1(c), по такому изображению и выполнялся расчёт площади.

С помощью данного алгоритма разработан программный модуль, позволяющий в автоматическом режиме производить сегментацию кадров и выполнять расчёт площадей кристаллов по массиву изображений, на которые фрагментировались экспериментальные видеозаписи. Программ-мный модуль Image Autoprocessing Tool (IAT) создан в среде MATLAB R2007b при использовании встроенного пакета Image Processing Toolbox.

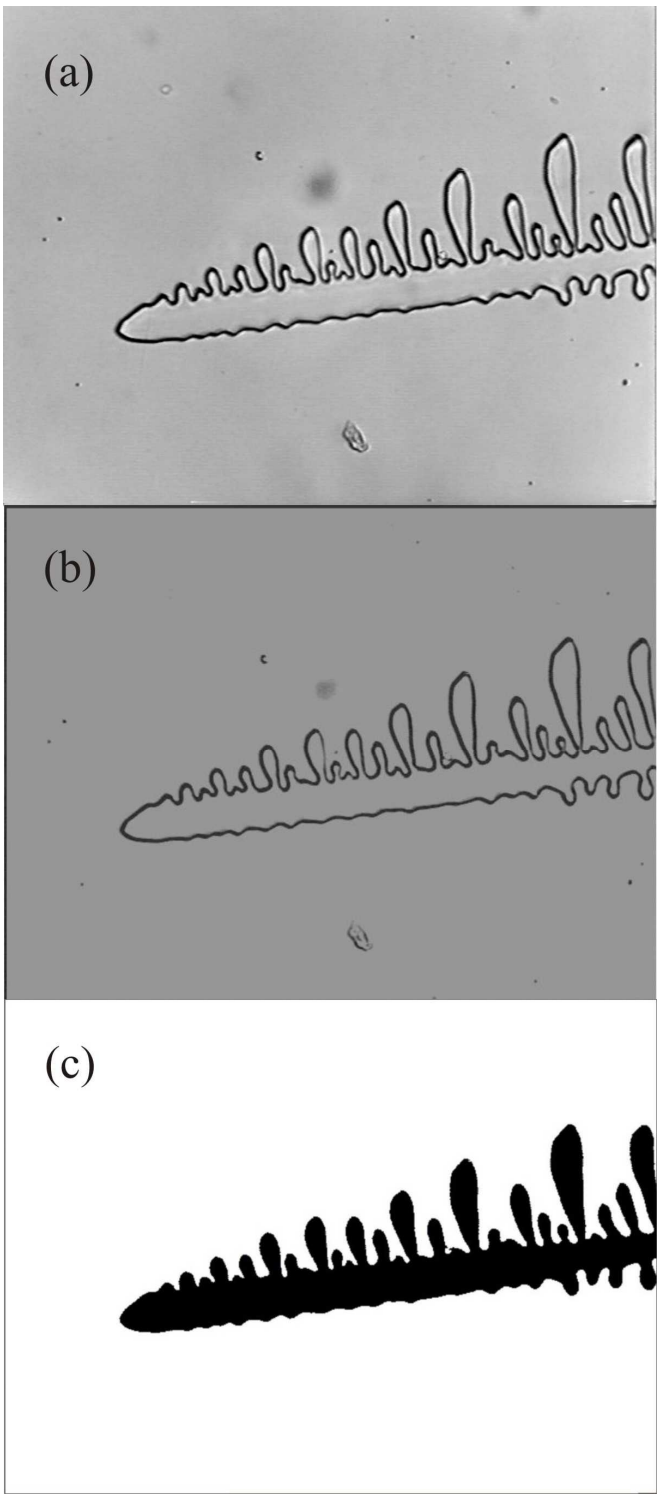

Рисунок1–Этапы обработки фрагменти-рованных видеокадров на примере одного из экспериментальных сним-ков: (a) - исходное изображение; (b)–изображение после гамма-коррекции; (c)– изображение, по которому выпол-нялся расчёт площади

На начальном и заключительном этапах роста кристалла отношение его площади $S(t)$ или его прироста $S'(t)$ к площади пикселя достаточно велико, в результате эти величины определяется с большой погрешностью. В работе использовались только те экспериментальные значения $S(t)$ и $S'(t)$, относительные ошибки которых не превышали 20%.

В третьей главе приводятся результаты обработки видеозаписей, расчета и анализа изученных кристаллических структур.

В начале главы, на основе принципа максимума производства энтропии, отмечается возможность существования универсального параметра, характеризующего свободный рост кристаллической системы. Действительно, одним из следствий принципа является равенство плотностей производства энтропии разных морфологических форм кристалла (разные кристаллы, разные ветви) при их одновременном развитии. Для структур 1 и 2 можно записать:

$$j_1 \tilde{N} \mu_1 = j_2 \tilde{N} \mu_2 , \qquad (1)$$

где j – поток, а μ – химический потенциал. Для простейшего случая роста сферических структур одной плотности при одинаковом пересыщении $\Delta\mu$ можно записать $j_i \sim m_i'/R^2_i$ и $\tilde{N}\mu_i = \Delta\mu/R_i$, где m_i' – скорость изменения массы кристалла. В результате согласно (1), учитывая одинаковую плотность, имеем:

$$m_1' / m_1 \approx m_2' / m_2 . \qquad (2)$$

С помощью теории размерностей в диссертации получен математический вид величины $m'(t)/m(t)$ для широкого круга растущих неравновесных систем. Для наиболее простого случая, когда среда не изменяет свои свойства со временем, оказывается справедливо:

$$m' = a \cdot m / t , \qquad (3)$$

где a – некоторая безразмерная постоянная. Уравнение (3) выполняется достаточно хорошо на начальной стадии любого роста, например, такая зависимость была эмпирически получена Шмальгаузеном для роста на начальных стадиях онтогенеза. Формула (3) обобщается для случая, когда условия роста изменяются благодаря самому росту. Естественно предположить, что это изменение пропорционально только массе растущего тела. В результате (3) преобразуется следующим образом:

$$m' = a \cdot m / t - b \cdot m , \qquad (4)$$

где b – некоторая положительная постоянная, имеющая размерность обратную времени.

Кроме того, удельный прирост $m'(t)/m(t)$ был рассмотрен в диссертации на простейшей модели растущего дендрита для кинетически-лимитируемого ($v(t)$=const и $R(t)$=const) и для диффузионно-лимитируемого режимов ($v(t) = W/\sqrt{t}$, $R(t) = X\sqrt{t}$). Здесь R – радиус кривизны вершины дендрита, v – скорость её роста, W, X - константы, зависящие от пересыщения и физико-химических характеристик кристаллизующейся системы. Известно, что кристалл дендритной морфологии представляет собой некоторую упорядоченную совокупность ветвей, близких по форме к параболе. Уравнение движения фронта такой параболы вдоль оси ординат описывает уравнение: $y(x,t) = -x^2/2R(t) + \int_0^t v(t)dt$, где x и y – координаты. Используя его, обнаружено, что величина $m'(t)/m(t)$ для кинетически- и диффузионно-лимитируемого режимов равна $2/t$ и $1/t$, соответственно. Таким

образом, удельный прирост массы у одновременно растущих дендритов оказывается одинаковым.

Полученный математический вид удельного прироста использован ниже для описания экспериментальных данных.

Для сравнения частей одного кристалла между собой необходимо иметь какие-то идентичные геометрические области, в которых происходит рост. В качестве них были выбраны треугольные области (секторы). Примеры расположения таких секторов для дендритов и водорослеобразных структур показаны на Рисунках 2 и 3 соответственно.

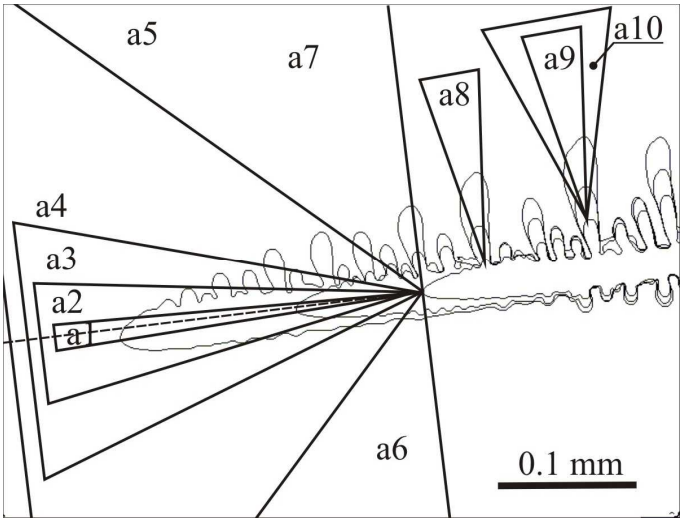

Рисунок 2 – Пример расположения секторов, используемых для измерения площади дендрита

Результаты расчета структур позволяют сделать следующие выводы:

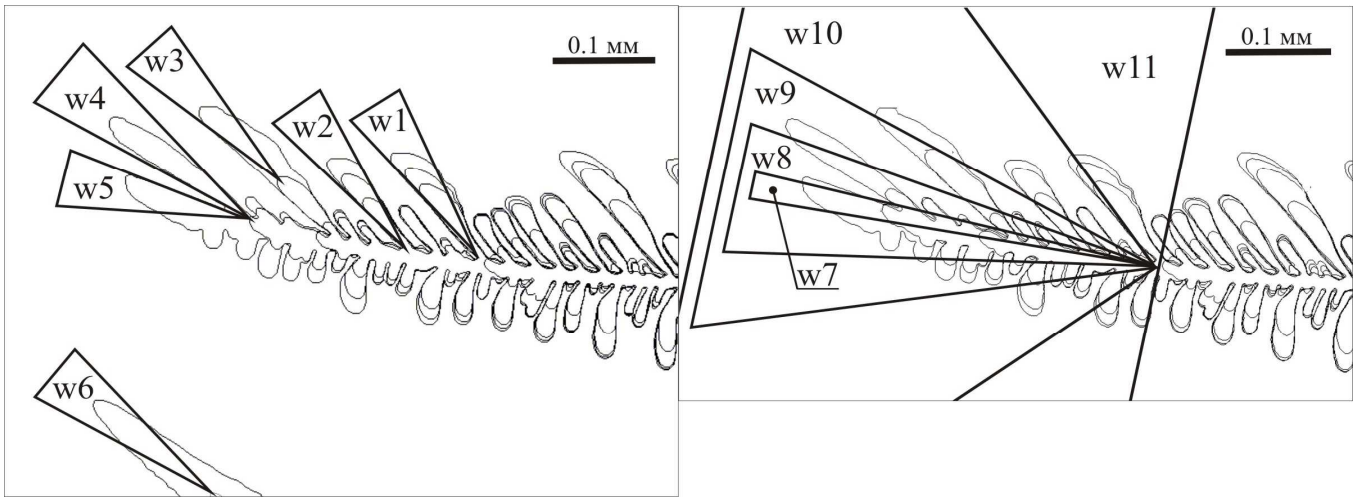

Рисунок 3 – Пример расположения секторов, используемых для измерения площади водорослеобразных кристаллических структур

1. Зависимости площади от времени имеют S-образный характер. Для различных секторов наблюдения эти зависимости существенно различаются (Рисунок 4(а)). На основе (4) аналитическая зависимость для описания $S(t)$:

$$S(t) = Ct^{a}e^{-bt}, \qquad (5)$$

где C – некоторая константа, a и b – эмпирические коэффициенты.

Соотношение (5) получило название DS-модели (по первым буквам слов dendrite и seaweed). Описательная способность DS-модели, как показали расчеты, оказывается сопоставима с традиционными моделями: логистической, Ричардса, Гомпертца и Вейбулла. Однако в отличие от них, DS-модель позволяет определить конечное время остановки роста, тогда как остальные модели такой возможности не дают.

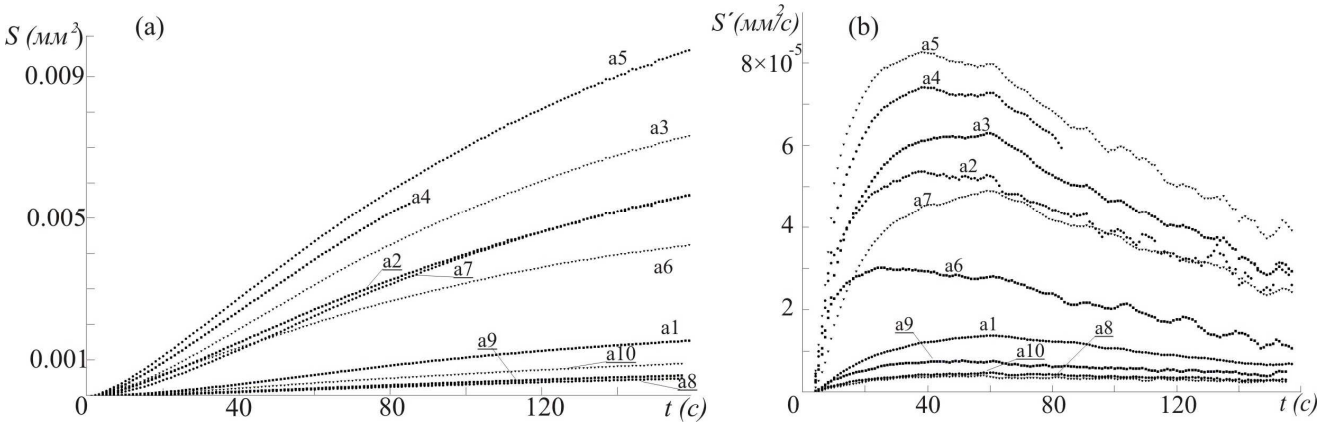

Рисунок 4 – Результаты измерения зависимости площади (a) и скорости изменения площади (b) от времени для дендрита, изображенного на Рисунке 2

2. Согласно полученным зависимостям $S(t)$, разные одновременно растущие ветви можно разделить на сосуществующие и несосуществующие. Примером сосуществующих структур являются ветви в секторах a1-a10 (Рисунок 2), зависимости $S(t)$ для которых показаны на Рисунке 4(a). Примеры несосуществующих структур наблюдаются, в частности, в секторах w4 и w3 (Рисунок 3). Действительно, для приведенного временного интервала структура в секторе w4 только заканчивает ускоренный рост, тогда как структура в секторе w3 уже выходит на стадию замедления (Рисунок 5). Причинами этого могут стать разное время возникновения структур, отличие в их условиях роста (из-за различия в пересыщении, наличия примесей, окружающих ветвей и т.д.), более или менее сильная конкуренция за ресурс между разными частями кристалла.

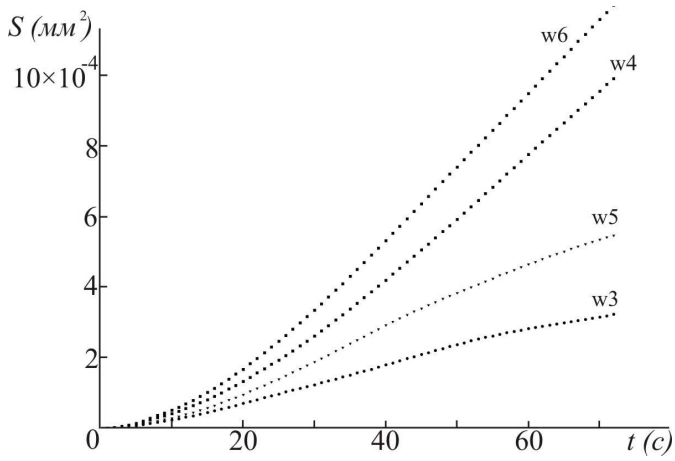

Рисунок 5 – Пример зависимостей площади от времени для секторов (Рисунок 3), находящихся на разных стадиях роста (несосуществующих)

Несмотря на существенное отличие $S(t)$ и $S'(t)$ (Рисунок 4(b)) для различных сосуществующих структур, величины $S'(t)/S(t)$ совпадают в пределах 20%, как это показано на Рисунке 6, при этом отличие удельного прироста для несосуществующих существенно выше (для w3 и w4 отличие достигает 120%).

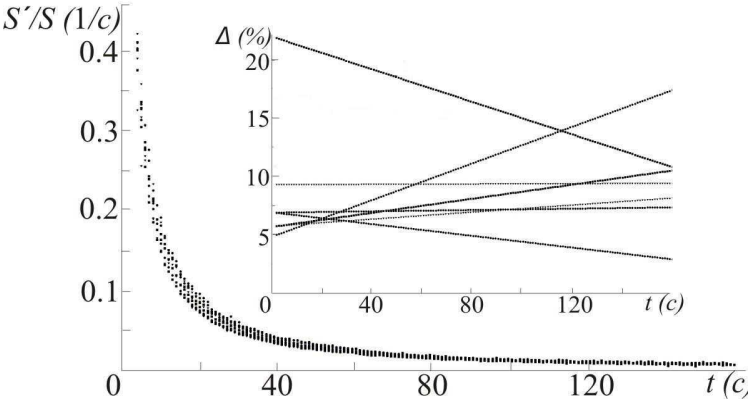

Рисунок 6 – Значения удельного прироста площади S'/S от времени роста дендрита t для различных секторов на Рисунке 2. На вставке приведено относительное отличие каждого сектора от сектора a2

3. Выполнена аппроксимация экспериментальных значений

$S'(t)/S(t)$ DS-моделью (4,5), которую можно представить в виде:

$$S'/S = a/t - b, \qquad (6)$$

В Таблицах 1 и 2 приведены значения a и b, полученные для секторов, представленных на Рисунках 2 и 3. Коэффициент детерминации составил не менее 0.99. При этом обнаружилось, что для *всех* рассмотренных структур (сосуществующих/несосуществующих) значения коэффициента a находятся в диапазоне 1.8±0.1. Значения коэффициента b, определяющего продолжительность роста, не обладают подобной закономерностью и могут варьироваться от структуры к структуре (при этом для сосуществующих b имеют близкие значения, а для несосуществующих – отличающиеся).

Таблица 1

Значения коэффициентов DS-модели (6), полученные при аппроксимации экспериментальных данных для секторов на Рисунке 2

Параметры	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10
a	1.8	1.9	1.7	1.7	1.6	1.6	1.5	1.7	1.7	1.5
b x10^{-2}	0.7	1.0	0.8	1.0	0.8	0.9	0.7	0.6	0.5	0.3

Таблица 2

Значения коэффициентов DS-модели (6), полученные при аппроксимации экспериментальных данных для секторов на Рисунке 3

Параметры	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	w10	w11
a	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.8	1.8	1.9	1.9	1.8	1.7
b x10^{-2}	1.5	1.6	1.4	0.8	1.3	0.7	1.0	1.1	1.2	1.0	1.1

Четвертая глава посвящена проверке применимости результатов, полученных при изучении кристаллического роста, для описания изменения массы растущих живых организмов, для которых зависимости массы от времени детально представлены в литературе.

Отбор данных производился по следующим критериям: полнота выборки (наличие сведений о массе в процессе всего периода роста и не менее десяти значений); достоверность (данные для каждого вида получены на основе изучения не менее тридцати особей). В результате использовались зависимости изменения массы от времени для следующих видов: ласточка (*Iridoprocne bicolor*), олуша (*Sula bassana*), пыжик (*Ptychoramphus aleuticus*), альбатрос (*Thalassarche melanophris*), лещ (*Abramis brama*), густера (*Blicca bjoerkna*), лангуст (*Jasus edwardsii*), омар (*Nephrops norvegicus*), таракан (*Periplaneta americana*), саранча (*Schistocerca gregaria*), морской котик (*Arctocephalus gazella*), кролик (*Sylvilagus aquaticus*), землеройка (*Cinereus ohioensis*), крыса (*Millardia meltada*), коза (*Capra hircus*), черепаха (*Chrysemys picta*), змея (*Spalerosophis cliffordi*), бухарник шерстистый (*Holcus lanatus*), крыжовник (*Actinidia chinensis*).

Статистический анализ показал, что DS-модель не уступает классическим зависимостям (логистической, Гомпертца и Берталанфи). Безразмерный коэффициент a рассматриваемой DS-модели является наиболее важным. Согласно обработанным данным, его величина лежит в диапазоне от 1 до 2.5, что очень

близко к значениям, полученным при исследовании кристаллического роста (1.8±0.1). Таким образом, коэффициенты a оказываются очень близкими, несмотря на различную природу систем, в которых происходит рост.

С целью проверки подобия данных, проведено обезразмеривание всех экспериментальных зависимостей $m(t)$ для изученных кристаллов и живых организмов на полное время роста $t^*=a/b$ и максимальную массу $m^*=m(t^*)$. Учитывая (5), зависимость безразмерной массы $\tilde{m}$ от безразмерного времени $\tilde{t}$ после логарифмирования будет выглядеть следующим образом:

$$\ln(\tilde{m})/a = \ln(\tilde{t}) - \tilde{t} + 1. \qquad (7)$$

Согласно Рисунку 7 все исследованные зависимости (как кристаллические, так и биологические) $m(t)$ в безразмерном виде ложатся на одну прямую, что указывает на существование некоторой универсальной характеристики у растущих систем.

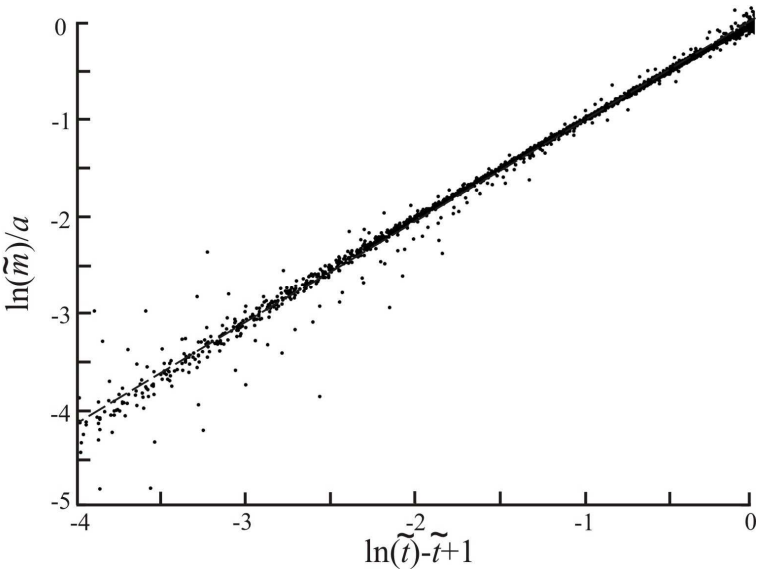

Рисунок 7 – Зависимость безразмерной массы $\tilde{m}$ как для исследованных кристаллических, так и биологических структур от безразмерного времени $\tilde{t}$, построенная в преобразованной логарифмической системе координат

DS-модель согласуется с законом онтогенетической аллометрии (предложенным Дж. Хаксли (1932)) о связи относительных изменений массы растущих частей организма (органов). Продемонстрировать эту согласованность можно, предположив, что $m_1(t)$ и $m_2(t)$ – массы двух одновременно растущих орга-нов некоторого организма. Тогда с учетом (4) после преобразований получается:

$$\ln m_1 / m_1 = (a_1 / a_2) \times \ln m_2 / m_2 + \lambda \qquad (8)$$

или

$$m_1 \sim m_2^{(a_1/a_2)} \exp(\lambda t), \qquad (9)$$

где $\lambda = (a_1 b_2 - a_2 b_1)/a_2$. Выражение (9) при $\lambda = 0$ выражает принцип онтогенетической аллометрии. При $\lambda \neq 0$ этот принцип обобщается и становиться применим к ряду биологически важных случаев (например, для описания связи массы мозга и массы всего организма).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведено экспериментальное исследование неравновесной, нестационарной кристаллизации в пересыщенном водном растворе хлористого аммония с нерегулярной формой границы фаз. Разработан и реализован программный модуль, с помощью которого восстановлены временные зависимости площадей (масс) формирующихся квазидвумерных кристаллов и их частей из полученных экспериментальных видеозаписей.

2. Обнаружено совпадение величины удельного прироста массы $m'(t)/m(t)$ в пределах 20 процентов для сосуществующих кристаллов NH_4Cl и их частей, несмотря на существенное отличие у них массы $m(t)$ и прироста массы $m'(t)$.

3. Предложена DS-модель ($m'/m=a/t-b$) для описания величины удельного прироста массы растущих кристаллов (и их частей). На основе обработки опытных данных установлено, что коэффициент a=1.8±0.1 носит универсальный характер, а коэффициент b определяется длительностью нестационарного роста.

4. Показано соответствие DS-модели экспериментальным зависимостям роста массы от времени для живых организмов разных таксономических групп. При этом значения коэффициента a для большинства видов попадают в диапазон от 1 до 2.5, который включает значения a, полученные для кристаллов. Обнаружена связь DS-модели с моделью Шмальгаузена, а также установлена её согласованность с законом онтологической аллометрии.

5. Установлено, что DS-модель описывает экспериментальные данные для кристаллических и биологических систем не хуже классических S-образных временных зависимостей. Однако, в отличие от них, DS-модель позволяет определить время остановки роста, которое равно отношению коэффициентов a/b.

6. Обезразмеривание полученных экспериментальных зависимостей массы от времени на полное время роста и максимальную массу, достигаемую за это время, позволяет получить универсальный закон для растущих кристаллических структур и живых организмов.

Статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК

1. **Terentiev P.S.** Normalized increment of crystal mass as a apossible universal parameter for dendritic growth / L.M. Martyushev, **P.S. Terentiev** // **Physical Review E. – 2012. – Vol.85. – P.041604 (1-9) (0,4 п.л./0,2 п.л.).**
2. **Terentiev P.S.** Specific mass increment and nonequilibrium crystal growth / L.M. Martyushev, **P.S. Terentiev** // **Physica A. – 2013. – Vol.392. – P.3819-3826 (0,4 п.л./0,2 п.л.).**

Свидетельства о регистрации

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ **2014614311**(RU). Программный модуль для автоматического расчета площади кристаллов на сегментированных бинарных снимках Image Autoprocessing Tool (IAT) / **П.С. Терентьев**, Л.М. Мартюшев – Зарег. 2014.

Статьи в других научных изданиях

1. **Тереньтев П.С.** Нахождение площади квазидвумерных кристаллов по видеоданным низкого качества / **П.С. Тереньтев**, Л.М. Мартюшев // **Сб. материалов Семнадцатой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых, г. Екатеринбург, 25 марта - 1 апреля 2011 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 545 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
2. **Terentiev P.S.** Mass increment for unsteady ammonium chloride dendrite growth in quasi-two-dimensional capillary / **P.S. Terentiev**, L.M. Martyushev // **Twenty-third conference on Crystal Growth and Epitaxy. Stanford Sierra Camp, Fallen Leaf Lake, CA, USA. June 3rd-6th 2012 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
3. **Терентьев П.С.** Закономерности роста кристаллов NH4Cl различных морфологий при свободном неравновесном росте / **П.С. Терентьев**, Л.М. Мартюшев // **Тезисы докладов. Конференция стран СНГ по росту кристаллов. Харьков, 1-5 октября 2012 г. – Харьков, 2012. – С.13 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
4. **Терентьев П.С.** Кинетика неравновесной кристаллизации хлористого аммония из водного раствора / **П.С. Терентьев**, Л.М. Мартюшев // **Синергетика в общественных и естественных науках. Девятые Курдюмовские чтения: материалы Международной междисциплинарной научной конференции с элементами научной школы для молодежи, г. Тверь, 17-21 апреля, 2013 г. – Тверь, 2013. – С.133 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
5. **Terentiev P.** Growth kinetics of seaweeds and dendrites during non-equilibrium crystallization. [Электронный ресурс] / **P. Terentiev**, L. Martyushev // **The 19th American Conference on Crystal Growth and Epitaxy in conjunction with The 16th US Biennial Workshop on Organometallic Vapor Phase Epitaxy, Keystone, Colorado, USA, July 21-26, 2013** // Режим доступа: http://crystalgrowth.us/accge19/Prelim_Abstract_Display.php?EID=682 свободный. – Яз. англ. **(0,02 п.л./0,01 п.л.).**
6. **Терентьев П.С.** Новая модель для описания массы растущего организма от времени / **П.С. Терентьев**, Л.М. Мартюшев // **Сборник тезисов и программа конференции. Международная конференция молодых ученых. Экспериментальная и теоретическая биофизика '13 21-23 октября 2013 г. – Пущино, 2013. – С.87-88 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**
7. **Тереньтев П.С.** Измерение площади кристалла на основе видеоданных микроскопических исследований / **П.С. Тереньтев**, Л.М. Мартюшев // **Сб. трудов. “Физические технологии и их информационное обеспечение” III научно-практическая конференция студентов и молодых ученых кафедры технической физики. – Екатеринбург, 2011. – С. 62-70 (0,4 п.л./0,2 п.л.).**
8. **Терентьев П.С.** Универсальный характер изменения массы со временем у неравновесных систем / **П.С. Терентьев**, Л.М. Мартюшев // **Тезисы докладов I Международная молодежная научная конференция, посвященная 65-летию основания Физико-технологического института. – Екатеринбург, 2014. – С. 244-245 (0,02 п.л./0,01 п.л.).**

Подписано в печать 24.10.2014 Формат 60х84 1/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 0,92
Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано в типографии ИПЦ УрФУ
620000, Екатеринбург, ул. Тургенева,4