

На правах рукописи

ЗАКИНЯН РОБЕРТ ГУРГЕНОВИЧ

**КИНЕТИКА РОСТА И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК ВОДЫ
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ**

25.00.30 - Метеорология, климатология и агрометеорология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Нальчик 2004

Работа выполнена в Высокогорном геофизическом институте

Научный консультант: доктор физико-математических наук,
профессор АБШАЕВ М.Т.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Кузнецов А.Д.
доктор физико-математических наук,
профессор Дикинов Х. Ж.
доктор физико-математических наук,
профессор Баташев ХЛ

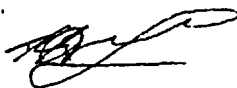
Ведущая организация: Научно-производственное объединение
«Тайфунл, Институт экспериментальной метеорологии, г. Обнинск.

Защита состоится 18 июня 2004 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 327.001.01 при Высокогорном геофизическом институте по адресу: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Высокогорного геофизического института, г. Нальчик, пр. Ленина 2.

Автореферат разослан "18" апреля 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор географических наук



Разумов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Несмотря на то, что в настоящее время физические законы, определяющие кинетику роста и кристаллизацию пленок, на поверхностях тел, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля, в целом известны, все еще имеется ряд нерешенных проблем.

Нет единого представления об образовании слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Актуальным является изложение таких явлений как обледенение самолетов, проводов, образование слоистой структуры градин с единых позиций.

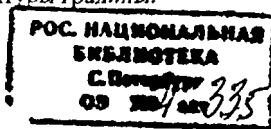
Важным аспектом кинетики роста и кристаллизации пленок является режим течения пленки на поверхности тела. Но здесь до конца не выяснено влияние режима течения пленки на поверхности тела, помещенного в поток переохлажденного аэрозоля, на образование слоистой структуры льда. Большой вклад в решение данного вопроса внесли Качурин Л.Г. и Жекамухов М.К. Однако остается открытым вопрос о толщине пленки, которая может устойчиво сохраняться на поверхности тела в процессе кристаллизации.

Исследованию пленки на поверхности градины посвящены работы многих ученых как у нас в стране, так и за рубежом. Но нет ясного представления об условиях образования пленки и срыва капель с поверхности градины. В то же время общеизвестным, является то, что толщина пленки имеет огромное значение для радиолокационных исследований градовых облаков и радиолокационной индикации града, и отделения его от дождя. Кроме того, установление условий, при которых происходит срыв капель с поверхности градины, может способствовать решению вопросов, связанных с генерацией крупных капель "мокрыми градинами".

Существование мокрых градин и срыв с их поверхности положительно заряженных капель лежит в основе теории образования и разделения зарядов в грозовых облаках Воркмана - Рейнольдса. Однако механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации остается открытым. Существующие теории образования объемно заряда на фронте кристаллизации Латама-Мейсона и Качурина-Бекряева дают противоположные результаты. Поэтому представляется актуальным выяснение механизма образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки.

Важным аспектом кинетики кристаллизации пленок является механизм формирования структуры льда. Здесь не до конца понятно, в частности, влияние кристаллической фракции облака на образование слоистой структуры градины.

Характерной особенностью роста льда является ее пузырьковая структура. Теоретическое объяснение пузырьковой структуры градины было проведено Жекамуховым М.К. Однако остался открытым вопрос о влиянии водности облака на образование пузырьковой структуры градины.



В. Мюрреем и Р. Листом, а также М.И. Глисовым экспериментально установлена зависимость диаметра воздушных пузырьков при кристаллизации жидкости от температуры окружающей среды. Представляет интерес дать теоретическое объяснение экспериментально обнаруженным зависимостям.

Известно, что различные слои льда имеют также различную кристаллографическую структуру. Поэтому представляется важным выяснение механизма формирования кристаллографической структуры льда. Однако остается открытым вопрос о том, как происходит образование зародышей кристалла в переохлажденной жидкости: гомогенно или гетерогенно.

Для скорости образования зародышей кристалла в переохлажденной жидкости общепринятой считается формула Турнбулла-Фишера, в которую входит величина энергии активации, для которой, как замечает Л.Г. Качурин, методов расчета и экспериментального определения не существует. При такой постановке вопроса величина энергии активации превращается в сильнейший параметр подгонки. Поэтому представляется важным развитие кинетической теории образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости.

Таким образом, решение этих проблем является актуальным и имеет огромное значение как для физики облаков в целом, так и для понимания кинетики роста и кристаллизации пленок на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Решению вышеприведенных проблем посвящена настоящая диссертация.

Целью работы является:

- исследование кинетики роста и кристаллизации пленок воды на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- построение единой теории образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля;
- исследование влияния режима течения пленки на образование слоистой структуры льда;
- определение условий срыва капель с поверхности пленки;
- влияние кристаллической фракции на слоистую структуру льда;
- исследование пузырьковой структуры льда;
- выяснение механизма образования объемного заряда на фронте кристаллизации в процессе кристаллизации пленки;
- исследование скорости гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости;
- кинетика формирования кристаллографической структуры льда.

Научная новизна работы

1. Впервые с единых позиций построена теория образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм (пластины, цилиндра, сферы). Тем самым, дано единое объяснение таким явлениям как обледенение самолетов, обледенение проводов и рост градин. Предложенный метод дистанционного определения опасности обледенения самолетов закреплен патентом РФ.

2. Исследовано влияние режима движения пленки на поверхностях тел различных форм на механизм теплопроводности и образование слоистой структуры льда.

3. Определены условия и границы применимости существующих теории роста градин. Решена задача роста градин с учетом нелинейной зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки.

4. Определено условие срыва капель с поверхности жидкой пленки. Установлена толщина пленки и критическая водность, при которой происходит срыв капель с поверхности пленки.

5. Объяснена экспериментально установленная нелинейная зависимость интенсивности обледенения тел от водности облака.

6. Установлена степень влияние кристаллической фракции облака на образование слоистой и кристаллографической структуры льда.

7. Дано теоретическое объяснение экспериментально установленной зависимости пузырьковой структуры градины от температуры окружающей среды и водности облака.

8. Предложен механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации жидкой пленки.

9. Теоретически исследована скорость гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости. Установлен закон роста кристаллов в переохлажденной жидкости, образующейся на поверхности сферической градины, в процессе сухого и мокрого роста.

Таким образом, в диссертационной работе разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как новое крупное достижение в области микрофизики облачных процессов в целом и кинетики роста льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля.

Научная и практическая ценность работы

1. Единый механизм образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, таких как пластина, сфера и цилиндр, позволяет решить задачу роста и кристаллизации пленки на поверхностях тел сложных форм.

2. Установленная зависимость механизма теплопроводности от режима течения пленок позволяет понять особенность роста льда при турбулентном

режиме течения пленки на поверхности тела.

3. Предложенная теория роста градин является наиболее общей из существующих теорий, что позволяет более точно определить толщину пленки на поверхности градины, температуру на поверхности пленки и, тем самым, понять влияние перечисленных факторов на структуру образующегося льда.

4. Предложенное условие срыва капель с поверхности пленки позволяет определить устойчивую толщину пленки на поверхности тела, рассчитать число капель, срывающихся с поверхности пленки. Полученные результаты имеют огромное значение при радиолокационном исследовании градовых облаков и при выявлении роли "мокрых" градин, как генераторов крупнокапельной фракции.

5. Рост градины происходит в облаке со смешанной фракцией, поэтому учет влияния кристаллической фракции на рост градины также имеет огромное значение для понимания процессов, происходящих в облаках.

6. Анализ пузырьковой структуры градины позволит восстановить «историю жизни» градины.

7. Предложенный механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации позволит уяснить механизм разделения зарядов в облаках.

8. Проведенные исследования по кинетике гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости позволяют понять аэрозольный состав и кристаллографическую структуру зародыша и слоев градины и могут служить основой для развития гетерогенной теории кристаллизации.

На защиту выкосятся:

1. Единый механизм образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля.

2. Результаты исследования режима течения пленки и его влияния на кинетику роста и кристаллизации.

3. Результаты исследований роста льда с учетом нелинейной зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки.

4. Результаты исследования срыва капель с поверхности пленки.

5. Результаты исследований влияния кристаллической фракции на рост и структуру льда.

6. Результаты исследований пузырьковой структуры градины и ее зависимости от температуры и влажности облака.

7. Механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки.

8. Результаты исследования по кинетике гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости и зависимости скорости их образования от режима роста льда.

9. Результаты исследования по кинетике формирования кристаллографической структуры льда.

Личный вклад автора

Автором лично получены следующие результаты: 1. Единство механизмов образования слоистых структур льда на поверхностях тел различных форм (обледенение самолетов, обледенение проводов, рост градин); 2. Влияние кристаллической фракции на образование слоистой структуры градины; 3. Условие срыва капель с поверхности градины; 4. Зависимость пузырьковой структуры градины от температуры окружающей среды и водности облака; 5. Механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки на поверхности градины; 6. Кинетика гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости; 7. Закон роста кристаллов в переохлажденной жидкости, образующейся на поверхности градины при сухом и мокром росте.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на семинарах и итоговых сессиях Ученого Совета ВГИ, всероссийских конференциях по физике облаков (Нальчик 1997, 2001), 46 научно-методической конференций (Ставрополь, 2001), V региональной научно-технической конференции (Ставрополь, 2001), семинарах кафедры общей физики Ставропольского государственного университета, семинарах кафедры физики Ставропольского филиала Ростовского военного института ракетных войск.

По теме диссертации опубликовано 42 научные работы, имеется 2 патента.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы составляет 290 страниц, включая 284 страницы основного текста, 42 рисунков, 6 страниц приложения. Список литературы содержит 283 наименований, из них 213 на русском и 70 на английском языках.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении определяется объект исследования, обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель исследования. Оценены научная новизна и научная и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дан обзор состояния по кинетике роста и кристаллизации пленок на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Из обзора сделан вывод об актуальности выбранной цели и сформулированы задачи, которые необходимо решить для достижения цели диссертации.

Во второй главе исследуется механизм образования слоистой структуры льда на поверхности пластины, помещенной в поток переохлажденного аэрозоля. Для понимания кинетики кристаллизации пленки важным является исследование влияния режима течения пленки на формирование слоистой структуры льда.

В разделе 2.1 исследуется турбулентный режим движения пленки, образуемой на поверхности, пластины. В данном разделе показано, что в отличие от теории Л.Г. Качурина, в которой предполагается линейный профиль скорости течения в пленки, скорость течения жидкости при турбулентном режиме течения распределена в пленке (в ядре турбулентности) равномерно. Исходя из этого, получено отличное от теории Л.Г. Качурина выражение для коэффициента турбулентной теплопроводности. С учетом указанных изменений решалась задача роста льда под пленкой при турбулентном режиме течения.

Показано, что толщина пленки h на поверхности пластины, находящейся в потоке переохлажденного водного аэрозоля, при турбулентном режиме движения изменяется по закону:

$$\frac{dh}{dt} = u - \frac{h}{\tau}, \quad (1)$$

где

$$u = \frac{dz^*}{dt} = \frac{qE}{\rho} V \quad (2)$$

— скорость продвижения поверхности пленки z^* за счет притока капель аэрозоля, зависит от скорости V и водности q воздушного потока; ρ , E — соответственно плотность воздуха и коэффициент захвата;

$$\tau = \frac{\rho_{\kappa} L}{\rho c \Delta T} R^{0,2} \frac{\kappa}{V^2} \quad (3)$$

— время релаксации; ρ_{κ} , ρ — соответственно плотность кристалла и плотность воды; L , c — соответственно удельная теплота кристаллизации и теплоемкость воды; R — число Рейнольдса воздушного потока; V — скорость потока; κ — характерный коэффициент турбулентной теплопроводности. Второе слагаемое в правой части (1) есть скорость движения фронта кристаллизации при турбулентном режиме течения пленки.

Решение (1) имеет вид

$$h = h_0 e^{-t/\tau} + h_y (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4)$$

где h_0 — начальная толщина пленки. Из (4) видно, что при турбулентном

режиме течения пленки толщина пленки стремится к установившейся толщине $h_y = \dot{u}t$. При этом образуется прозрачная однородная структура льда.

В разделе 2.2 решается задача роста льда под пленкой при ламинарном режиме течения пленки, а также определяется время перехода режима течения от ламинарного режима в турбулентный режим.

Показано, что при ламинарном режиме течения рост пленки происходит по закону:

$$\frac{dh}{dt} = u - \frac{k_0}{h}, \quad (5)$$

где

$$k_0 = \frac{\rho c \Delta T}{\rho_{\kappa} L} k. \quad (6)$$

Здесь первое слагаемое в правой части (5) есть скорость продвижения поверхности пленки за счет притока капель, а второе слагаемое есть скорость движения фронта кристаллизации. Из (6) следует, что при $\Delta T = 0$ $k_0 = 0$. При этом, кристаллизация прекращается, а пленка растет с постоянной скоростью за счет притока капель.

Из (5) следует, что существует равновесная толщина пленки, равная

$$h_p = \frac{k_0}{u}. \quad (7)$$

Решение (5) имеет вид:

$$h - h_0 + h_p \ln \left| \frac{h - h_p}{h_0 - h_p} \right| = ut. \quad (8)$$

Из (5) и (8) следует, что если при ламинарном течении толщина пленки меньше равновесной величины ($h_0 < h_p$), то пленка на поверхности тела не устойчива и со временем исчезает. При этом образуется матовая неоднородная структура льда. Только лишь при $h_0 > h_p$ пленка на поверхности тела будет расти. При этом будет образовываться прозрачная однородная структура льда.

Показано, что существует критическая толщина пленки, равная $h_{\kappa} = \sqrt{h_y h_p}$, при которой происходит переход от ламинарного режима движения пленки к турбулентному режиму.

Из анализа фазовых диаграмм для уравнений движения фронта кристаллизации при различных режимах течения пленки сделан вывод, что при установившемся режиме кристаллизации имеет место равенство: $h_p = h_{\kappa} = h_y$. Отсюда сделан вывод о существовании критической равновесной толщины пленки. Для воды это значение, найденное экспериментально Л.Г. Качуриным, равно $h_{\text{пк}} = 0,13$ см.

В разделе 23 установлено, что существует критическое значение вод-

ности q_k потока, определяющее переход от ламинарного режима течения пленки в турбулентный

$$q_k = \frac{2}{R^{0,1}} \text{ [г/м}^3\text{]}, \quad (9)$$

где R - число Рейнольдса. Таким образом, если водность потока больше критической, то имеет место турбулентное движение пленки. При этом образуется прозрачная однородная структура льда. Если же водность потока меньше критической, то имеет место ламинарное движение пленки. При этом образуется матовая неоднородная структура льда. На рис. 1 приведен график зависимости критической водности от числа Рейнольдса.

Таким образом, во второй главе показано, что слоистая структура льда на поверхности пластины, помещенной в поток переохлажденного водного аэрозоля, определяется равновесной толщиной пленки.

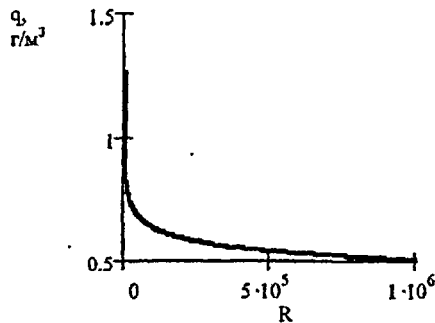


Рис. 1. К зависимости критической водности, определяющей переход от матовой к прозрачной структуре льда, от числа Рейнольдса.

В третьей главе исследуется механизм образования слоистой структуры льда на поверхности сферы, помещенной в поток переохлажденного водного аэрозоля. Задача решалась на примере сферической градины. В главе 3 результаты, полученные в главе 2 для пластины, развиты для случая сферы. В разделе 3.1 показано, что коэффициент турбулентной теплопроводности определяется выражением $\bar{K}_T = BRh^2$, где $B = 6,5 \cdot 10^2 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$ - константа. Так, например, для градины радиусом $R = 1 \text{ см}$ и толщиной пленки $h = 0,1 \text{ см}$ $\bar{K}_T = 6,5 \text{ см}^2/\text{с}^2$, что на три порядка выше коэффициента молекулярной теплопроводности $k = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/\text{с}$. Показано, что также как и для пластины, слоистая структура градины определяется равновесной толщиной пленки.

В разделе 3.2 решается задача роста льда на поверхности градины при ламинарном и турбулентном режимах течения с учетом тепло- массообмена

на поверхности пленки.

Получено выражение для обобщенного параметра Маклина

$$M = \frac{q_k EV}{\Delta T} = \frac{4c\rho k}{h_{рк}[L_k - c(T_0 - T_\infty)]}, \quad (10)$$

характеризующего переход от сухого режима роста градины к мокрому. Установлена связь между обобщенным параметром Маклина и критической равновесной толщиной пленки.

В разделе 33 с единых позиций построена теория образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Установив закономерности роста льда на поверхности пластины и сферы при различных режимах течения пленки, с учетом тепло-массообмена на поверхности пленки» сделан вывод об идентичности формул, определяющих режим роста пленки. Показано, что отличия возникают только в количественных выражениях для числа Нуссельта и коэффициента формы. Отсюда сделан вывод о единстве механизмов образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Тем самым, слоистая структура льда при обледенении самолетов, обледенении проводов и росте градин объясняется с единых позиций.

Таким образом, в третьей главе сделан важный вывод о единстве механизмов образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля.

В четвертой главе проводится дальнейшее исследование кинетики роста пленок. Исследования проводились как для пластины, так и для сферы. В предыдущих главах температура поверхности пленки считалась постоянной. В разделе 4.1 теория роста градин развивается с учетом тепло-массообмена на поверхности пленки и нелинейной зависимости температуры поверхности последней от толщины пленки.

Анализ существующих теорий роста градин показал, что существуют два различных подхода к решению данной задачи. Л.Г. Качуриным было показано, что слоистая структура льда на поверхности тела, помещенного в поток переохлажденного водного аэрозоля, определяется равновесной ТОЛЩИНОЙ пленки. Недостатком теории Качурина является то, что в ней не учтен тепло-массообмен на поверхности пленки и температура поверхности пленки считается постоянной. Другой подход наиболее полно отражен в работах МК. Жекамухова, согласно которым, если водность облака больше некоторой критической водности Шумана-Лудлама $q_{ш-л}$, то на поверхности градины образуется жидкая пленка, которая со временем растет до некоторого значения, после чего происходит срыв капель с поверхности пленки. Если же водность облака $q < q_{ш-л}$, то градина растет в сухом режиме и при этом образуется матовая структура льда. Какой же из подходов верен? В диссертации показываются границы применимости обеих теорий. Условие $q > q_{ш-л}$

не достаточно, чтобы на поверхности градины образовалась устойчивая пленка. А именно, толщина пленки должна быть больше некоторой равновесной величины, чтобы она устойчиво сохранялась или росла на поверхности градины.

Согласно М.К. Жекамухову температура поверхности пленки изменяется по закону

$$\theta_{\Pi} = \theta_{\infty} \frac{h}{h_T + h}, \quad (11)$$

где $h_T = 0,3R^{1/4}$; θ_{∞} - температура окружающей среды.

Из (11) видно, что при $h=0$ $\theta_{\Pi}=0$, т.е. $T_{\Pi}=T_0$ температура поверхности пленки равна температуре фронта кристаллизации; а при $h \rightarrow \infty$ (или $h \gg h_T$) $\theta_{\Pi} \rightarrow \theta_{\infty}$. Так при $-\theta_{\infty} = -10$ °С, $R = 0,5$ см и $h = h_{PK}$ получим $-\theta_{\Pi} = -3$ °С, т.е. температура поверхности пленки намного выше температуры окружающей среды.

Итак, в теории Качурина считается, что температура поверхности пленки есть величина постоянная. А это, как следует из (11), верно при большой толщине пленки $h \gg h_T$. В теории Жекамухова считается, что температура поверхности пленки пропорциональна толщине пленки, что, как следует из (11), верно при малой толщине пленки $h \ll h_T$. В диссертации развивается теория роста градин в общем случае, когда температура поверхности пленки описывается выражением (11).

Для скорости изменения толщины пленки получено уравнение

$$\frac{dh}{dt} = u - \frac{k'_0}{h_T + h}, \quad (12)$$

где $k'_0 = \lambda\theta_{\infty}/\rho L_{\kappa} = (c\theta_{\infty}/L_{\kappa})\kappa$, c - удельная теплоемкость воды, κ - коэффициент молекулярной температуропроводности воды. Здесь первое слагаемое в правой части это скорость движения поверхности пленки за счет притока капель; второе слагаемое — скорость движения фронта кристаллизации, но с учетом тепло-массообмена на поверхности пленки и нелинейной зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки.

Из формулы (12) следует, что существует равновесная толщина пленки

$$h_p = \frac{k'_0}{u} - h_T, \quad (13)$$

которая определяет режим роста пленки на поверхности градины.

Решение (12) имеет вид

$$h - h_0 + (h_T + h_p) \ln \left| \frac{h - h_p}{h_0 - h_p} \right| = ut, \quad (14)$$

где h_0 - начальная толщина пленки.

Из формулы (14) видно, что, чтобы пленка росла с образованием прозрачной однородной структуры льда, толщина пленки должна быть больше равновес-

ной величины, в противном случае пленка постепенно исчезает, а рост градины происходит в сухом режиме с образованием матовой неоднородной структуры льда.

Таким образом, учет нелинейной зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки не изменил наш вывод о существовании равновесной толщины пленки, определяющей режим роста пленки.

В диссертации показано, что существует некоторая критическая водность облака, названная в работе критической водностью Качурина,

$$q_K = \frac{4\lambda\theta_\infty}{L_K E V h_{PK}}, \quad (15)$$

определяющая режим роста градины. При водности облака большей критической водности Качурина на поверхности градины образуется устойчивая пленка, увеличивающаяся со временем, градина же растет в мокром режиме. При водности облака меньшей критической водности Качурина пленка на поверхности градины со временем исчезает, градина же растет в сухом режиме.

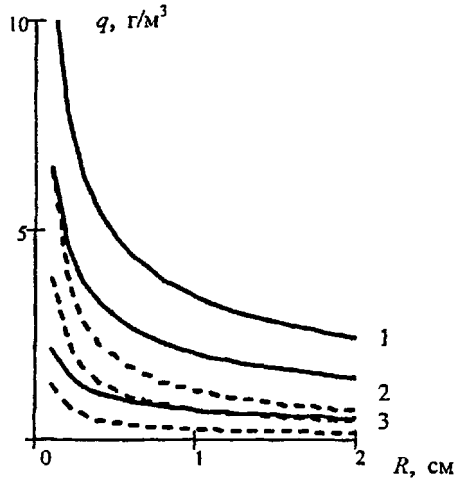


Рис. 2. К зависимости критических значений водностей Шумана-Лудлама (пунктир) и Качурина (сплошная линия) от радиуса градины при температуре окружающей среды -2 (1), -6 (2) и -10 °C (3).

Таким образом, сухой или мокрый режим роста градины определяется не критической водностью Шумана-Лудяама, а критической водностью Качурина, так как если водность облака больше критической водности Шумана-

Лудлама, но меньше критической водности Качурина, то пленка, образующаяся на поверхности градины, будет неустойчивой, со временем исчезнет, и градина будет расти в сухом режиме. На рис. 2 приведены графики зависимости критических водностей Шумана-Лудлама и Качурина от радиуса градины при различных значениях температуры окружающей среды.

Из сравнения скоростей сухого и мокрого роста градин найден критический радиус градины $R_{кр}$, при котором скорости сухого и мокрого роста выравниваются

$$R_{кр} = \left(\frac{G_0 \beta h_{рк} \rho_{л}}{2 \rho_{г}} \right)^4, \quad (16)$$

где $G_0 = 7 \cdot 10^{-2}$; $\beta = 97,8 \text{ см}^{-3/4}$. Подставив в (16) $\rho_{г} \approx 0,5 \text{ г/см}^3$ (это плотность градины, имеющей матовую структуру) и $\rho_{л} = 0,92 \text{ г/см}^3$ (это плотность чистого льда), получим $R_{кр} \approx 0,4 \text{ см}$ (или критический диаметр $d_{кр} \approx 0,8 \text{ см}$). Если радиус градины меньше критического значения ($R < R_{кр}$), то скорость сухого роста градины больше скорости мокрого роста, т.е. благоприятен сухой рост градины. При $R > R_{кр}$ скорость мокрого роста градины больше скорости сухого роста. Т.е. благоприятен мокрый рост. Это согласуется с исследованиями М.И. Глисова, согласно которым, градины диаметром до 1 см растут в сухом режиме.

В разделе 4.2 проводятся детальные расчеты и строятся графики зависимости критической водности Шумана-Лудлама и Качурина от радиуса градины при различных температурах окружающей среды. А также зависимость температуры поверхности пленки от температуры облака при различных значениях радиуса.

В разделе 4.3 получено условие, при котором происходит срыв капель с поверхности градины. Под действием касательного напряжения, обусловленного воздушным потоком, пленка приходит в движение. С увеличением толщины пленки скорость движения поверхности пленки увеличивается. И если скорость движения поверхности пленки больше скорости падения градины, происходит срыв капель с поверхности пленки. Определена толщина пленки h_c , при которой происходит срыв капель с поверхности градины

$$h_c = \frac{2}{c_f} \frac{\mu}{\rho_{в} V}. \quad (17)$$

Из формулы (17) следует, что толщина пленки, при которой происходит срыв капель с поверхности градины, обратно пропорциональна скорости падения градины V . Подставляя численные значения: $c_f = 0,6$; $\mu = 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\rho_{в} = 1 \text{ кг/м}^3$, получим

$$h_c = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{V} M = \frac{6}{V} \text{ мм.} \quad (18)$$

В формуле (18) скорость падения градины измеряется в м/с. В частности, из (18) следует, что при скорости падения градины $V = 10 \text{ м/с}$ толщина пленки, при которой происходит срыв капель, равна $h_c = 0,6 \text{ мм}$. Если R измерять в см, а h_c в мм, то получим

$$h_c = \frac{0,3}{\sqrt{R}} \text{ мм.} \quad (19)$$

Из (19) следует, что для градины радиусом $R = 1 \text{ см}$ толщина пленки, при которой происходит срыв капель, равна $h_c = 0,3 \text{ мм}$.

Получено выражение для критической водности, при которой происходит срыв капель с поверхности пленки, образующейся на поверхности градины,

$$\frac{q_c}{q_{\text{Ш-Л}}} = \frac{h_T}{h_T - h_c}. \quad (20)$$

Отсюда следует, что скорость роста градины будет ограничена критической водностью *срыва*. На рис. 3 приведена зависимость скорости роста градины от водности облака для градины радиусом 1 см при температуре воздуха -10°C .

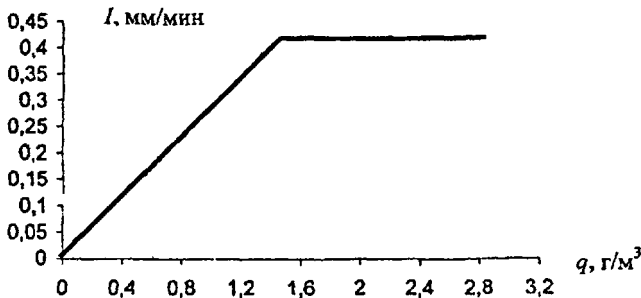


Рис. 3. К зависимости скорости роста градины от водности облака для градины радиусом 1 см при температуре окружающего воздуха -10°C .

На рис. 4 приведены экспериментальная кривая зависимости интенсивности обледенения самолетов от водности облака, полученная В.Д. Степаненко - линия 1, и теоретическая зависимость - линия 2. Из рисунка видно удовлетворительное согласие теории с экспериментом.

Таким образом, в четвертой главе исследуется кинетика роста л кристаллизации пленок на поверхностях тел различных форм (сфера, пластина), помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля, с учетом зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки.

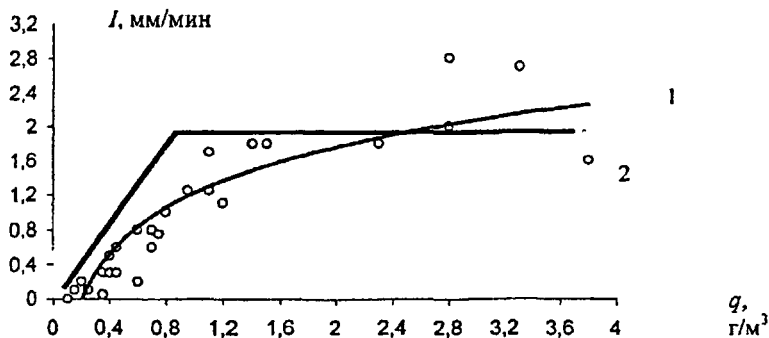


Рис. 4. К зависимости интенсивности обледенения от водности облака. 1- экспериментальная кривая В.Д. Степаненко, 2 – теоретическая кривая.

В пятой главе исследуются некоторые особенности формирования структуры льда. В разделе 5.1 учитывается влияние кристаллической фракции облака на образование слоистой структуры льда. Показано, что наличие кристаллической фракции в потоке аэрозоля увеличивает критическую водность Шумана-Лудлама на величину ледности потока

$$q'_{ш-л} = q_{ш-л} + q_{л} \quad (21)$$

Аналогично, на такую же величину увеличивается водность, при которой происходит срыв капель с поверхности градины. Анализируются результаты экспериментального исследования влияния кристаллической фракции аэрозольного потока на рост градин, проведенного Хоргуани В.Г., Тлисовым М.И., Экбой Я.А. Согласно Хоргуани В.Г., наличие кристаллической фракции в потоке должно увеличить критическую водность облака. Однако это увеличение незначительно для реальных значений ледности в облаке. Наблюдаемый же срыв капель с поверхности градин происходит при больших водностях «о сравнению с (21). При этом расхождение составляет 50 - 60 % и более (рис. 5). То есть наличие кристаллов в потоке не объясняет большую водность срыва.

Наблюдаемое в эксперименте превышение на 50 - 60 % критической водности, при которой происходит срыв капель, над критической водностью Шумана-Лудлама, объясняет формула (20), связывающая водность, при которой происходит срыв капель с поверхности градины, с критической водностью Шумана-Лудлама. Из нее следует, что даже в отсутствии кристаллической фракции критическая водность срыва больше критической водности Шумана-Лудлама. Оценим это превышение для градины радиусом $R = 1$ см. Для этого размера градины $h_T = 0,3$ см, $h_C = 0,1$ см. Подставляя в (20), получим $q_c/q_{ш-л} = 1,5$, т.е. действительно критическая водность срыва в полтора раза больше критической водности Шумана-Лудлама. Учет кристаллической

фракции лишь незначительно увеличит, согласно (21), критические водности срыва и Шумана-Лудлама, поэтому $q'_c/q'_{ш-л} \approx 1,5$.

Тот факт, что срыв капель происходит при водности, намного превышающей критическую водность Шумана-Лудлама, является дополнительным подтверждением нашего вывода о том, что на поверхности градины может существовать только лишь пленка определенной толщины. Действительно, если бы это было не так, то при водности облака, лишь чуть отличающейся от критической водности Шумана-Лудлама, на поверхности градины образовалась бы пленка, и она росла бы до некоторой величины, при которой произошел бы срыв капель. То есть мы наблюдали бы срыв капель уже при водности облака лишь чуть превышающей критическую водность Шумана-Лудлама. Но эксперимент не подтверждает этого. Для того чтобы на поверхности градины образовалась устойчивая пленка, водность облака должна быть больше критической водности Качурина, а не Шумана-Лудлама.

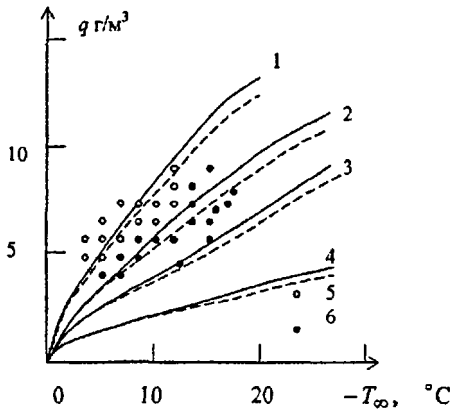


Рис. 5. Зависимость критической водности облака со смешанной микроструктурой (сплошные кривые) и без кристаллической фракции (пунктирные кривые) от температуры среды.

1 - $R = 0,25$ см; 2 - $R = 0,5$ см; 3 - $R = 1,0$ см; 4 - $R = 2,5$ см. Точки 5,6 соответствуют наблюдаемому срыву капель с поверхности градин радиусом, соответственно, $R = 0,5$ и

$R = 1,0$ см при $\beta = \frac{q_ж}{q_л} = 20$ в экспериментах Хоргуани В.Г., Тлисова М.И., Эжб Я.А.

В разделе 5.2 исследуются закономерности формирования пузырьковой структуры льда. Образование воздушных пузырьков объясняется тем, что растворимость воздуха во льду в 10^3 меньше, чем в воде. Следовательно, кристаллизация вызывает вытеснение воздуха из жидкости. Поэтому перед фронтом кристаллизации концентрация воздуха увеличивается и при дости-

жении критических пересыщений в 10 - 40 % в зависимости от скорости движения фронта кристаллизации начинается образование воздушных пузырьков.

Теоретические основы формирования пузырьковой структуры градины были заложены Жекамуховым, При этом остался открытым вопрос о влиянии водности на формирование пузырьковой структуры льда.

Напомним вкратце суть теории Жекамухова. С продвижением фронта кристаллизации концентрация воздуха у фронта кристаллизации увеличивается. Диффузия же будет стремиться выровнять концентрацию. Таким образом, скорость накопления воздуха у фронта кристаллизации будет определяться двумя скоростями: скоростью движения фронта кристаллизации, обеспечивающая приток воздуха, и скоростью диффузии, обеспечивающая отток воздуха. Скорость движения фронта кристаллизации есть функция температуры окружающей среды и при данных значениях параметров атмосферы есть величина постоянная. Скорость диффузии обратно пропорциональна толщине пленки. И при малой толщине пленки скорость диффузии больше. Воздух успевает отводиться через пленку и накопления не происходит. При некоторой толщине пленки скорости притока и оттока воздуха выравниваются. Поэтому, если толщина пленки больше некоторого критического значения, у фронта кристаллизации происходит накопление воздуха. И при достижении критического пересыщения происходит образование пузырьков воздуха.

В диссертации показано, что толщина пленки определяется также притоком капель. А приток капель будет уменьшать концентрацию воздуха. С учетом этого для толщины пленки, при которой начинается образование пузырьков воздуха, получено выражение

$$h_* = \frac{\delta_k}{1 + \delta_k} \frac{k'_0 h_T}{D - \frac{\delta_k}{1 + \delta_k} - \frac{uh_T}{(1 + \delta_k)D}}, \quad (22)$$

где $\delta_k = 0,4$ - критическое пересыщение, при котором начинается образование пузырьков воздуха.

Из (22) следует, что:

- толщина пленки, при которой начинается образование пузырьков воздуха, прямо пропорциональна радиусу градины и обратно пропорционально температуре окружающей среды;
- с увеличением водности, толщина пленки, при которой образуются пузырьки воздуха, увеличивается. То есть, с увеличением водности вероятность образования пузырьков воздуха уменьшается.

Подставляя в формулу (22) численные значения, получим

$$h_* \approx \frac{1,6h_T}{10\theta_\infty - qVh_T}, \quad (23)$$

где h_* и h_T измеряются в мм, q в $г/м^3$. V в $м/с$.

На рис. 6 приведены графики зависимости критической толщины пленки, при которой начинается образование пузырьков, от температуры окружающей среды. Расчеты приведены для градины радиусом $R = 1$ см (соответственно, $h_T = 3$ мм, $V = 20$ м/с). Из рис. 6 видно, что при меньшей водности, представленной непрерывной кривой, необходимо меньшее переохлаждение атмосферы для образования пузырьков. При большей водности, представленной пунктирной кривой, необходимо большее переохлаждение атмосферы.

Показано, что существует некоторое критическое значение водности, определяющее образование пузырьковой структуры льда при мокром росте градины. Если $q > q_{кр}$, то образование пузырьков не происходит, и образуется прозрачная однородная структура льда. При $q < q_{кр}$ происходит образование пузырьков воздуха.

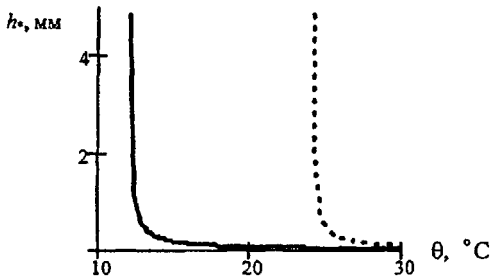


Рис. 6. К зависимости критической толщины пленки, при которой начинается образование пузырьков, от температуры окружающей среды (— $q = 2$ г/м³; - - - $q = 4$ г/м³).

Выражение для критической водности, при которой не происходит образования пузырьков воздуха, имеет вид

$$q_{кр} = (1 + \delta_k) \frac{4\rho_T k_0'}{EVh_T} = (1 + \delta_k) q_{Ш-Л}. \quad (24)$$

Рассматривая процесс образования пузырьков, как процесс зародышеобразования для диаметра воздушного пузырька в мкм получена формула:

$$d = \frac{351}{\Delta T}, \quad (25)$$

где ΔT — разность температур воздуха в пузырьке и в окружающей среде. Мюррей и Лист исследовали зависимость диаметра воздушных пузырьков, образующихся при кристаллизации капель, от температуры окружающей среды. Ими было показано, что эта зависимость для диаметра пузырьков в мкм хорошо аппроксимируется формулой:

$$d = \frac{400}{\theta - 2}, \quad (26)$$

где $\theta = T_0 - T_\infty$, а T_∞ - температура окружающего воздуха в К. Подобные эксперименты по кристаллизации крупных капель в аэродинамической трубе были поставлены М.И. Тлисовым. Им была получена следующая зависимость диаметра пузырьков от температуры окружающего воздуха:

$$d = \frac{490}{\theta - 2}, \quad (27)$$

На рис. 7 приведены теоретическая кривая (25), экспериментальные точки, полученные М.И. Тлисовым, а также графики зависимости по экспериментальным формулам Мюррея и Листа (26), и М.И. Тлисова (27). Сравнение формулы (25) с (26) и (27) показывает, что имеется хорошее согласие между экспериментом и теорией.

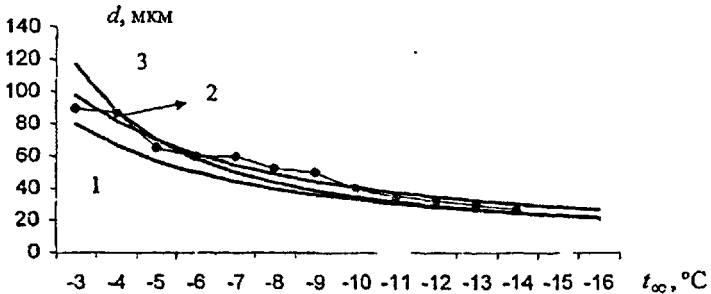


Рис. 7. К зависимости диаметра воздушного пузырька в замерзшей капле от температуры окружающего воздуха.

- 1 – экспериментальная зависимость Мюррея-Листа, по (26); 2 – экспериментальная зависимость М. И. Тлисова, по (27); 3 – теоретическая зависимость по (25);
 • - экспериментальные точки, полученные М.И. Тлисовым.

В разделе 53 предложен механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки на поверхности градины. Анализируются механизмы разделения зарядов при срыве капель с поверхности градины Воркмана-Рейнольдса и раскалывании закристаллизовавшихся капель Качурина-Бекряева. Главным недостатком обоих механизмов является не учет двойного электрического слоя на фронте кристаллизации, который всегда существует, согласно современным представлениям, на границе раздела двух фаз.

Согласно развиваемой в работе теории, отрицательный объемный заряд у фронта кристаллизации возникает благодаря наличию двойного электрического слоя на границе раздела двух фаз. Механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки сводится к следующему. С продвижением фронта кристаллизации двойной электрический слой притягивает

к себе встречающиеся на пути отрицательные ионы и отталкивает положительные. Это приводит к изменению концентрации ионов, соответственно, отрицательных вблизи фронта кристаллизации, а положительных вблизи поверхности пленки. Диффузия же будет стремиться выровнять концентрации. Эти две противоположные тенденции приводят к образованию объемного заряда, закон распределения которого в приграничном слое вблизи фронта кристаллизации имеет вид

$$\rho(x) = \rho_0 e^{-x/l_0}, \quad (28)$$

где l_0 - некоторый характерный пространственный параметр, характеризующий область локализации объемного заряда. На рис. 8 приведен график распределения объемного заряда, образующегося в процессе кристаллизации вблизи фронта кристаллизации.

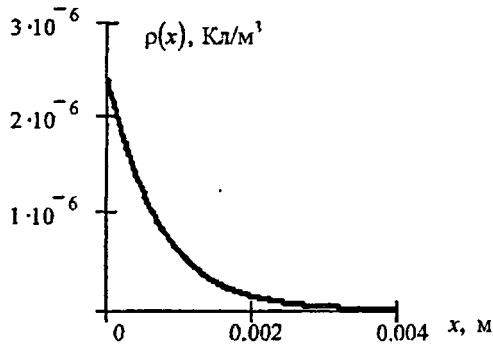


Рис. 8. К распределению объемного заряда у фронта кристаллизации (радиус градины $R = 1$ см; температура окружающей среды $-\theta_{\infty} = -10$ °C).

Таким образом, мы видим, что объемный отрицательный заряд локализуется в приграничном слое у фронта кристаллизации. Если толщина пленки больше толщины локализации заряда и с поверхности градины срываются капли, то они будут уносить положительный заряд. Если же толщина пленки меньше толщины локализации отрицательного объемного заряда, то срывающиеся с поверхности капли будут уносить отрицательный заряд. Показано, что для мелких градин, находящихся в более переохлажденных слоях облака, толщина локализации объемного заряда меньше, поэтому для них наиболее вероятен положительный заряд срывающихся капель. Для крупных же градин, находящихся в менее переохлажденных слоях облака, толщина локализации объемного заряда больше, поэтому для них наиболее вероятен отрицательный заряд срывающихся капель.

В главе 6 исследуется кинетика кристаллизации переохлажденной жидкости, образующейся на поверхности градины при сухом и мокром росте. Для скорости образования зародышей кристалла в переохлажденной жидкости общепринятой считается формула Турнбулла-Фишера, модифицированная Б. Дж. Мейсоном:

$$J = \frac{nkT}{h} \cdot \exp\left(-\frac{U + A_{\min}}{kT}\right), \quad (29)$$

где J - скорость образования кристаллических зародышей в единице объема в единицу времени; n - число молекул в единице объема в жидкой фазе; k - постоянная Больдмана; h - постоянная Планка; T - абсолютная температура жидкости; U - энергия активации для самодиффузии молекул в жидкости; A_{\min} - работа образования кристаллического зародыша. При этом, как замечает Л.Г. Качурин, методов расчета и экспериментального определения величины U не существует. При такой постановке вопроса величина U превращается в сильнейший параметр подгонки.

В разделе 6.1 развита кинетическая теория образования зародышей новой фазы для исследования кинетики кристаллизации переохлажденной жидкости. Получен закон роста зародышей кристалла, образующихся в переохлажденной пленке на поверхности градины, растущей в мокром режиме:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\text{макро}} = \frac{\lambda T}{\rho_{\text{л}} L_{\text{к}} h R} S_T (R - R_{\text{к}}), \quad (30)$$

где

$$R_{\text{к}} = \frac{2\sigma}{\rho_{\text{л}} L_{\text{к}}} \cdot \frac{1}{S_T}. \quad (31)$$

– критический радиус зародыша кристалла;

$$S_T = \frac{\theta_{\text{п}}}{T} \quad (32)$$

- переохлаждение пленки.

Установлено, что скорость образования зародышей кристалла J ($\text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) зависит от переохлаждения атмосферы и толщины пленки:

$$J(\theta_{\infty}) = 2,4 \cdot 10^{30} \cdot \frac{\theta_{\infty}^3 h^4}{T^4 R_{\text{гп}}^{5/4}} \cdot \exp\left\{-1,4 \cdot \frac{R_{\text{гп}}^{1/2} T}{h^2 \theta_{\infty}^2}\right\}. \quad (33)$$

График этой зависимости для градины радиусом $R_{\text{гп}} = 1 \text{ см}$ и толщиной пленки $h = 1 \text{ мм}$ приведен на рис. 9. Из рисунка 9 видно, что для гомогенной кристаллизации переохлажденной пленки толщиной 1 мм необходимо большое переохлаждение атмосферы, выше минус 40 градусов.

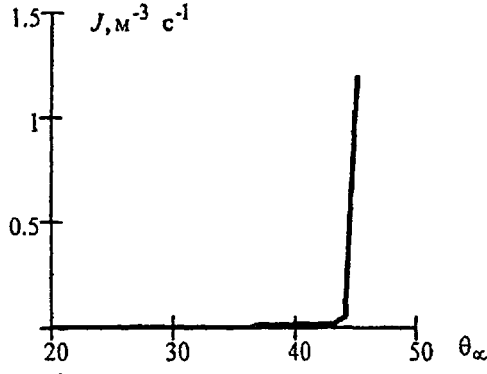


Рис. 9. К зависимости скорости гомогенного образования зародыщей твердой фазы от температуры окружающей среды при мокром росте градины (по формуле (33)).

Критический радиус зародыша в переохлажденной пленке определяется по формуле

$$R_k = \frac{4\sigma T_0}{\rho_d L_k G_0 \beta} \cdot \frac{R_{гр}^{1/4}}{h \theta_\infty}. \quad (34)$$

На рис. 10 приведен график зависимости критического радиуса зародыша твердой фазы от температуры окружающей среды для градины радиусом $R_{гр} = 1 \text{ см}$ и толщиной пленки $h = 0,1 \text{ мм}$. Из рисунка видно, что для гомогенной кристаллизации переохлажденной жидкости необходимо большое переохлаждения и критический радиус зародыша должен быть микронных размеров. Поэтому в реальных условиях атмосферы имеет место гетерогенная кристаллизация на ядрах кристаллизации. Роль ядер кристаллизации играют аэрозольные частицы микронных размеров. Отсюда можно сделать вывод, что при мокром росте градины центрами кристаллизации могут быть только лишь крупные аэрозольные частицы. Полученный вывод подтверждает мысль В. Г. Хоргуани о том, что роль ядер кристаллизации должны играть крупные аэрозольные частицы микронных размеров.

В разделе 6.2 развивается кинетика кристаллизации при сухом росте градины. Показано, что растут только лишь зародыши с радиусом большим критического значения

$$R_k = \frac{2\sigma T_0}{\rho_d L_k \theta_\infty}. \quad (35)$$

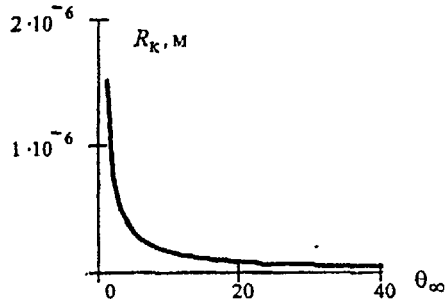


Рис. 10. К зависимости критического радиуса зародыша твердой фазы в переохлажденной пленке, образующейся на поверхности градины при ее мокром росте.

Зародыши же меньшего радиуса исчезают. При обычных условиях атмосферы размер критического зародыша меньше 0,1 мкм. На рис. 11 для сравнения приведены оба графика зависимости критического радиуса зародыша твердой фазы при сухом (нижний график) и мокром (верхний график) росте градины. Как видно из графика при сухом росте градины критический радиус зародыша меньше, чем при мокром росте. Поэтому центрами кристаллизации могут выступать аэрозольные частицы меньшего размера. Это согласуется с исследованиями Тлсовым по аэрозольному составу зародышей и слоев градин, согласно которым, в крупных зародышах и слоях сухого роста градин размер аэрозольных частиц меньше, чем в капельных зародышах и слоях мокрого роста.

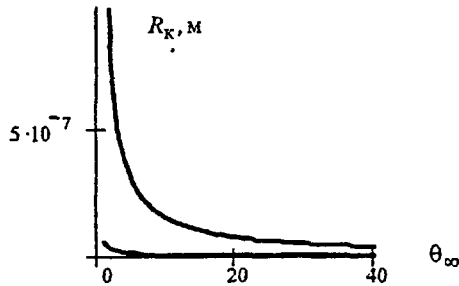


Рис. 11. Зависимость критических радиусов зародышей твердой фазы при сухом (нижний график) росте и мокром (верхний график) режиме роста градины.

Получено выражение для скорости образования кристаллических зародышей на фронте кристаллизации при сухом росте градины:

$$J(\theta_\infty) = 1,8 \cdot 10^{42} \cdot \frac{R_{\text{гп}}^{3,4} \theta_\infty^6}{T^5} \cdot \exp\left\{-\frac{68,5T}{\theta_\infty^2}\right\}. \quad (36)$$

График этой зависимости приведен на рис. 12. Из рисунка видно, при сухом росте градины кристаллизация может происходить при меньшем переохлаждении. Отсюда следует, что при реальных условиях атмосферы более вероятен сухой рост градины.

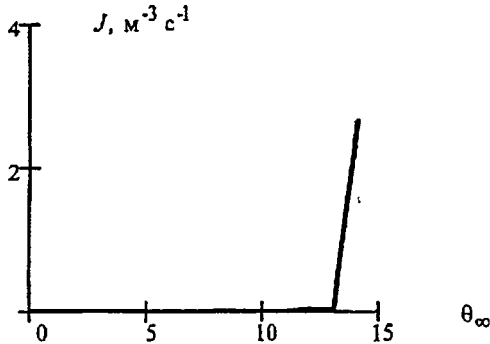


Рис. 12. К зависимости скорости образования зародышей твердой фазы на поверхности градины, растущей в сухом режиме, от температуры окружающей среды

В разделе 63 исследуется кинетика роста кристаллов на поверхности градины растущей в сухом и мокром режимах. Показано, что макроскопический, рост кристаллического зародыша при сухом росте градины определяется формулой

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)_{\text{макро}} = \frac{\lambda T_0 G}{\rho_{\text{л}} L_{\text{к}}} \cdot \frac{S_T (R - R_{\text{к}})}{R^2}, \quad (37)$$

где $S_T = \frac{\theta_\infty}{T_0}$ - переохлаждение атмосферы.

Решение уравнения (37) имеет вид

$$\left(\frac{R}{R_{\text{кр}}} + 1\right)^2 - \left(\frac{R_0}{R_{\text{кр}}} + 1\right)^2 + 2 \ln \frac{R - R_{\text{кр}}}{R_0 - R_{\text{кр}}} = \frac{2 \lambda \sigma T_0 G}{\rho_{\text{л}}^2 L_{\text{к}}^2 R_{\text{кр}}^3} \cdot t, \quad (38)$$

где R_0 - начальный размер зародыша кристалла. Из (38) следует, что зародыши с радиусом меньше критической величины со временем уменьшаются и исчезают, а растут только лишь зародыши с радиусом больше критической величины. Скорость роста зародыша кристалла определяется переохлаждением S_T (через критический радиус). Отсюда найдем, предельный закон роста

кристаллов для зародышей, радиус которых намного превышает критическое значение $R \gg R_k$

$$R = \sqrt{R_0^2 + \frac{\lambda \beta G_0}{2\rho_{\text{л}} L_k} R_{\text{гр}}^{1/4} \theta_{\infty} \cdot t}. \quad (39)$$

На рис. 13 приведен график роста зародыша кристалла на поверхности градины, растущей в сухом режиме. Из графика видно, что за время порядка нескольких секунд кристалл дорастает до миллиметровых размеров

Показано, что при мокром режиме роста градины рост кристаллов в переохлажденной пленке происходит по закону

$$\frac{R - R_0}{R_k} + \ln \frac{R - R_k}{R_0 - R_k} = \frac{\lambda}{4\sigma T} \cdot \frac{u \theta_{\infty}^2}{h_T^2} \cdot t^2. \quad (40)$$

Отсюда также следует предельный закон роста кристаллов при мокром росте градины

$$R = R_0 + \frac{\lambda G_0 \beta}{2\rho_{\text{л}} L_k} \frac{\theta_{\infty}}{R_{\text{гр}}^{1/4}} \cdot t. \quad (41)$$

На рис. 13 приведены для сравнения графики роста кристалла при сухом росте (верхний график) и мокром росте (нижний график). Как видно из рисунка за время роста кристалла при сухом режиме роста градины он успевает вырасти до больших размеров, по сравнению с кристаллом, растущим в мокром режиме. Отсюда следует, что для реальных условий в облаках градины, растущие в сухом режиме, всегда будут иметь размер кристаллов, больший, чем градины, растущие в мокром режиме. То есть слои сухого роста льда будут иметь крупнодисперсную структуру, а слои мокрого роста льда будут иметь мелкодисперсную структуру. Это согласуется с исследованиями Тлисова по кристаллографической структуре зародышей и слоев градин, согласно которым, «крупные зародыши и слои сухого роста льда имеют крупнодисперсную структуру» а капельные зародыши и слои мокрого роста имеют мелкодисперсную структуру. Большой скоростью роста кристаллов при сухом росте объясняется также то, что преимущественное образование града происходит на крупных зародышах. Это также объясняет то, что практически во всех градинах следующий после зародыша слой характеризуется структурой сухого роста.

В заключении даны основные выводы и результаты диссертационной работы, а также рекомендации по использованию полученных результатов.

В приложении П.1 приведено описание дистанционного метода определения интенсивности обледенения самолетов, закрепленного патентом РФ.

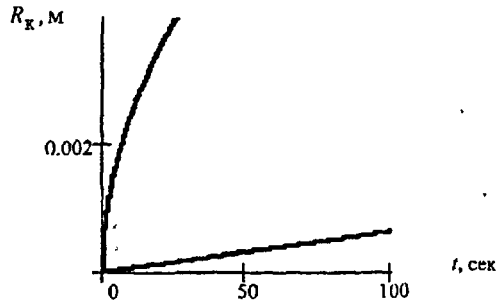


Рис. 13. К сравнению скоростей роста кристалла на поверхности градины, растущей в мокром режиме (нижний график) и сухом режиме (верхний график), при температуре окружающей среды -10°C .

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые с единых позиций построена теория образования слоистой структуры льда на поверхностях тел различных форм, помещенных в поток переохлажденного водного аэрозоля. Тем самым, дано единое объяснение таким явлениям как обледенение самолетов, обледенение проводов и рост градин.

2. Исследовано влияние режима движения пленки на поверхностях тел различных форм на образование слоистой структуры льда. Показано, что для образования прозрачной однородной структуры льда, пленка на поверхности тела должна быть больше некоторой равновесной величины. Только пленка с толщиной, большей равновесной величины, может устойчиво сохраняться на поверхности тела, в противном случае пленка исчезает и при этом образуется матовая неоднородная структура льда.

3. Построена теория роста градин с учетом нелинейной зависимости температуры поверхности пленки от толщины пленки. Показано, что режим роста градины определяется равновесной толщиной пленки, образующейся на ее поверхности.

4. Показано, что для того, чтобы кристаллизация проходила под устойчиво сохраняющейся пленкой на поверхности тела с образованием прозрачной однородной структурой льда, водность облака должна быть больше некоторой критической водности, названной в работе критической водностью Качурина. Если водность облака больше критической водности Шумана-Лудлама, но меньше критической водности Качурина, то пленка на поверхности градины с течением времени исчезнет, и мокрый режим роста сменится сухим. Лишь при водности облака большем, чем критическая водность Качурина, рост льда будет проходить в мокрому режиме.

5. Установлена закономерность срыва капель с поверхности пленки, заключающаяся в том, что под действием воздушного потока пленка приходит в движение и по достижении ею некоторой скорости происходит срыв капель. Получено выражение для критической водности и толщины пленки, при которой происходит срыв капель.

6. Теоретически подтверждена экспериментально установленная связь между диаметром воздушных пузырьков и температурой и водностью облака. Показано, что с уменьшением температуры окружающей среды вероятность образования пузырьков увеличивается, а с увеличением водности облака вероятность образования пузырьков уменьшается. Это связано с тем, что с уменьшением температуры окружающей среды увеличивается скорость движения фронта кристаллизации, что приводит к увеличению концентрации воздуха на границе раздела фаз лед-вода и, тем самым, увеличивает вероятность образования пузырьков воздуха. Увеличение же водности приводит к увеличению скорости притока капель, которые разбавляют концентрацию воздуха, тем самым, уменьшают вероятность образования воздушных пузырьков.

7. Предложен механизм образования объемного заряда в процессе кристаллизации пленки. Установлено, что наличие двойного электрического слоя на границе раздела фаз лед-вода приводит к образованию отрицательного объемного заряда. Это связано с тем, что с продвижением фронта кристаллизации двойной электрический слой притягивает отрицательные ионы и отталкивает положительные. Показано, что если толщина пленки больше толщины локализации отрицательного объемного заряда, то капли, срывающиеся с поверхности пленки, уносят положительный заряд. Если толщина пленки меньше толщины локализации объемного заряда, то капли, срывающиеся с поверхности пленки, уносят отрицательный заряд.

8. Исследована кинетика гомогенного образования зародышей твердой фазы в переохлажденной жидкости при сухом и мокром росте льда. Показано, что при реальных условиях атмосферы кристаллизация жидкости проходит гетерогенно на ядрах кристаллизации, так как для гомогенной кристаллизации необходимы большие переохлаждения атмосферы и размеры критических зародышей принимают значения нескольких микрон.

9. Установлено, что сухой режим роста льда наиболее вероятен, по сравнению с мокрым режимом. При сухом режиме роста необходимы меньшие переохлаждения атмосферы и меньший критический радиус зародыша, чем при мокром режиме.

10. Показано, что при сухом режиме роста льда размер аэрозольных частиц, выступающих в роли ядер кристаллизации, меньше, чем при мокром режиме. Данный вывод совпадает с экспериментальными данными по аэрозольному составу зародышей и слоев градин, согласно которым в крупных зародышах и слоях сухого роста градин размер аэрозольных частиц меньше, чем в капельных зародышах и слоях мокрого роста градин.

11. Показано, что скорость роста кристаллов при сухом режиме роста

больше, чем при мокром режиме. Установлена закономерность формирования кристаллографической структуры слоев льда. Показано, что слои сухого роста льда имеют крупнодисперсную структуру, а слои мокрого роста льда имеют мелкодисперсную структуру. Данный вывод совпадает с экспериментальными исследованиями по кристаллографической структуре зародышей и слоев градин, согласно которым крупные зародыши и слои сухого роста градин имеют крупнодисперсную структуру, а капельные зародыши и слои мокрого роста градин имеют мелкодисперсную структуру.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Физико-статистическая модель "урожай - осадки" для засушливых и влагообеспеченных районов Ставропольского края. // Труды ВГИ. - 1992. - Вып. 85. - С. 64 - 70. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г.
2. Об оценке физической эффективности работ по ИУО в Ставропольском крае. // Труды ВГИ. - 1992. - Вып. 85. - С. 71- 77. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г.
3. Экономическая эффективность работ по ИУО в Ставропольском крае. // Труды ВГИ. - 1992. - Вып. 85. - С. 77 - 80. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г.
4. К теории педиабатического подъема сухого (или влажного ненасыщенного) термика при переменном показателе вовлечения. // Труды СФ ВГИ. -1993.-Вып. 1.-С. 101-107. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г.
5. Об оценке эффекта воздействия в неадиабатических моделях конвекции. // Труды СФ ВГИ. -1993. - Вып. 1. - С. 108 - 115. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г.
6. К скорости движения дождевой капли, падающей в аэрозольной среде. // Труды СФ ВГИ. - 1993. - Вып. 1. - С. 116 - 121. Соавтор: Экба Я.А.
7. К режиму движения и кристаллизации пленки на поверхности предмета, помещенного в поток переохлажденного аэрозоля. // Труды СФ ВГИ. - 1993. - Вып.1.- С. 122-129.
8. К механизму образования слоистой структуры льда, растущего в потоке переохлажденного аэрозоля. // Труды СФ ВГИ. - 1993. - Вып.1. - С. 130 - 139.
9. Некоторые аспекты образования слоистой структуры льда. // Труды СФ ВГИ. -1993. - Вып.1. - С. 140 - 148.
10. Патент № 2099746 на изобретение "Способ прогнозирования опасности обледенения самолетов в переохлажденных облаках". / Атабиев М.Д., Байсиев Х-М. Х., Экба Я.А., Щукин Г.Г., Модин М.Ю., Мельников Ю.А. и Закинян Р.Г. Приоритет изобретения 22 ноября 1993 г.
11. The Artificial Enhancement of the Liquid Precipitation on the North Caucasus. WMO/TD N 596, Sixth WMO Sc. Conf. on Weather Mod., Italy - 1994. - V.I. - P. 295-296. Co-authors: Ekba Ya. A., Kaplan L. G., Atabiev M.D., Badakhova G. Kh.

12. Оценка физического эффекта воздействия при ИУО в Ставропольском крае. // ОППМ. - 1995. - Т.2. - С. 156 - 165. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г
13. Патент № 2099933 на изобретение "Способ вызывания осадков из конвективных облаков с использованием самолет". / Атабиев М.Д., Байсиев Х.М. Х. и Закинян Р.Г. Приоритет изобретения 25 июня 1996 г.
14. Оценка дополнительной урожайности озимого пшеницы при ИУО в Ставропольском крае. // ОППМ. - 1996. - Т.3. - Вып. 2. - С. 163-173. Соавторы: Экба Я.А., Каплан Л.Г., Лашманов Ю.К.
15. Calculation of parameters of cumulonimbus cloud taking involvement into account. 12 Int. Conf. On Cloud and Precip. - Zurich. - 1996. - P. 530 - 531. Co-authors: Ekba Ya. A., Vatiashvily M. R., Zhekamukhov M. K.
16. The research of the possibility of inversion layers piercing -through by the growing convective clouds. 12 Int. Conf. on Cloud and Precip. - Zurich. - 1996. - P. 530 - 531. Co-authors: Ekba Ya. A., Atabiev M.D.
17. К теории роста градин. Тезисы докладов Всеросс. конф. по ФО и АВ на гидромет. проц. - Нальчик, 1997. - С. 9 - 10. Соавтор: ЭкбаЯ.А.
18. Влияние скрытой теплоты кристаллизации на интенсивность конвекции - при воздействии на облака кристаллизующими реагентами. Материалы XLIII НМК, Ставрополь: СГУ, 1998. - С. 5 - 8. Соавторы: Экба ЯЛ., Ватишвили М.Р., Кусова А.А., Ярмолицкая О.П.
19. Оценка влияния термических и динамических факторов на развитие конвективного облака. Материалы ХЫП НМК. - Ставрополь: СГУ, 1998. - С. 50-53. Соавторы: Экба Я.А., Ватишвили М.Р.
20. К теории роста градин. - Метеорология и гидрология. - 2000. - № 10. - С. 59 - 67.
21. Геодезическая задача при градозащите (сферическая аппроксимация формы Земли). Материалы XLV НМК, СГУ. - Ставрополь. - 2000.- С. 57 - 62. Соавторы: Каплан Л.Г., Кусова А.А.
22. Геодезическая задача при градозащите (эллипсоидальная аппроксимация формы Земли). Материалы XLV НМК, СГУ. - Ставрополь. - 2000.- С. 62 - 65. Соавторы: Каплан Л.Г., Кусова А.А.
23. Определение уровня конвекции и максимальной скорости восходящих потоков во влажноадиабатической модели конвекции атмосферы // Труды ВГИ. - 2000. - Вып. 92. - С. 85 - 92.
24. К расчету количества и продолжительности ливневых осадков во влажноадиабатической модели конвекции атмосферы. // Труды ВГИ. - 2000. - Вып. 92. - С. 93-105.
25. К кинетической теории гомогенной конденсации пересыщенного водяного пара. Материалы 46 НМК. - Ставрополь: СГУ. - 2001. - С. 107 - 112.
26. О гомогенном образовании зародышей жидкой фазы в пересыщенном водяном паре. // Тезисы. Всероссийская конференция по ФО и АВ на ГМП. - Нальчик. - 2001. - С.94 - 96.
27. Об асимптотическом законе конденсационного роста зародышей жид-

- кой фазы в пересыщенном паре. // Тезисы. Всероссийская конференция по ФО и АВ на ГМГТ. - Нальчик. - 2001. - С.76 - 78.
28. Срыв капель с поверхности градины. // Тезисы. Всероссийская конференция по ФО и АВ на ГМП. - Нальчик. - 2001. - С.96 - 99.
29. Кинетика роста льда на поверхностях предметов различных форм, помещенных в поток переохлажденного аэрозоля. // Материалы V НТК СК ГТУ. - 2001. - С.20.
30. Оценка возможности проведения работ по модификации погоды в Объединенных Арабских Эмиратах. // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГТО). - 2001. - Вып. 3 (549). - С. 257 - 270. Соавторы: Атабиев М.Д., Лапшанов Ю.К.
31. К определению вертикальных профилей температуры, концентрации зарядов и потенциала в приповерхностном слое летательного аппарата. //XV НТК. Тезисы. - Ставрополь, Филиал РВИ РВ. - С. 112 - 113. (соавторы: Лошкарев В.А., Никитин П.В.)
32. К вопросу об образовании объемного заряда в приэлектродном слое разбавленной магнитной жидкости. // Известия вузов. СК регион. ЕН, 2002. - № 4. - С. 36 - 38. (соавторы: Падалка В.В., Бондаренко Е.А.)
33. К элементарной теории электроконвекции в приэлектродном слое магнитной жидкости. // Материалы региональной НК.- Ставрополь: СГУ. - 2002. - С. 376 - 380. (Соавтор: Падалка В.В.)
34. Теория образования слоистой структуры сферической градины. // ИФЖ. 2003. - Т. 76. - № 2. - С. 42 - 47.
35. Об одном механизме электропроводности магнитной жидкости с графитовым наполнителем. // Материалы 48 НМК. - Ставрополь. - 2003. - С. 29 - 32. (соавторы: Смерек Ю.Л., Закинян А.Р.)
36. О причинах фазового перехода вблизи электродов в магнитной жидкости в электрическом поле. // Материалы 48 НМК. - Ставрополь. - 2003. - С. 39 — 43. (соавторы: Диканский Ю.И., Нечаева О.А.)
37. Особенности движения капли магнитной жидкости в переменном магнитном поле. // Материалы 48 НМК. - Ставрополь. - 2003. - С. 47 - 51. (Соавторы: Беджанян М.А., Копылова О.С., Чуенкова И Ю., Козуб П.А.)
38. К скорости гомогенного образования зародышей жидкой фазы в пересыщенном паре. // Метеорология и гидрология. - 2003. - № 11. - С. 16 - 24.
39. О возможной причине фазового перехода вблизи электродов в магнитной жидкости в электрическом поле. // Вестник СГУ. - 2003. — Выпуск 34. — С. 35 - 39. (Соавторы: Диканский Ю.И., Нечаева О.А.)
40. К вопросу о влиянии объемного заряда на распределение электрического поля в конденсаторе с магнитной жидкостью. // Ш Международная НК. СевКавГТУ. - 2003. - С. 110 - 112. (Соавторы: Смерек Ю.Л.)
41. К распространению электромагнитных волн в ионосфере. // Физика ВП и РС. - 2003. - Т. 6. С. 52 - 55. (Соавторы: Левшенков В.Н., Никитин П.В.)
42. К термодинамике роста градин. Серия: Физика облаков. Облака, осадки и грозное электричество. - С. - П.: Гидрометеоздат, 2004. - 00 с.

Р Заня

№ - R372

Р. Г. Закинян

**КИНЕТИКА РОСТА И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНOK ВОДЫ
НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТЕЛ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ
(автореферат)**

Сдано в набор 16.04.2004 г. Подписано в печать 16.04.2004 г.
Печ. л. 2.0. Уч.-изд. л. 2,3. Заказ 119. Бесплатно

Типография ФРВИ РВ