



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Исследование льдообразующей активности хладореагентов»

Исполнитель

Меренкова Мария Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Крюкова Светлана Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

«25» июня 2025 г.

Санкт-Петербург

2025

Содержание

Введение.....	3
1 Теоретические аспекты исследования облаков и осадков.....	5
1.1 Образование облаков и их классификация	5
1.2 Микроструктура и водность облаков	13
1.3 Типы осадков и их классификация	15
2 Методы воздействий на атмосферные процессы	19
2.1 Реагенты для воздействия на облака	19
2.2 Технические средства для исследования эффективности методов активных воздействий	21
2.2 Технические средства для активных воздействий на облака	25
3 Анализ процессов ,происходящих вокруг частицы реагента при различных параметрах состояния атмосферы.....	31
3.1 Природа действия хладореагентов	31
Заключение	49
Список литературных источников	51
Приложение	52

Введение

В последние годы растет степень признания важности знаний в области гидрометеорологии. Это связано с тем, что мы всё чаще сталкиваемся с разрушительными последствиями засух, наводнений, ураганов, аномальной жары и резких перемен в погоде. Почти все (90%) стихийные бедствия в мире вызваны именно такими явлениями. В связи с этим большое значение приобретает систематическое изучение состояния атмосферы и атмосферных процессов.

Облака играют важнейшую роль в формировании погодных условий, а также они существенно влияют на различные аспекты человеческой деятельности. Это влияние особенно важно для сельского хозяйства, лесного хозяйства и различных транспортных отраслей, особенно авиации. Облака по-прежнему создают проблемы при взлёте, посадке и полёте самолётов. Полёт в облаках может привести к ухудшению видимости, обледенению и турбулентности.

Так как неблагоприятные погодные явления наносят существенный ущерб населению и хозяйственному комплексу, то необходимо проводить исследования по изучению возможности активных воздействий на процессы облакообразования и осадкообразования и разрабатывать эффективные методы для снижения наносимого ущерба.

Целью выпускной квалификационной работы является изучение льдообразующей активности хладреагентов.

Для достижения поставленной цели выпускной квалификационной работы выстраивается ряд задач, а именно:

Рассмотреть теоретические аспекты образования и классификации облаков;

- 1) Изучить виды реагентов и их воздействий на облака;
- 2) Рассчитать поле температуры на разных удалениях от частицы реагентов, критическое перенасыщение и относительную влажность над

водой, построить графики зависимости и найти границу спонтанной конденсации для CO_2 и C_3H_8 ;

- 3) Вычислить общее число ледяных зародышей и льдообразующую активность реагента и построить графики зависимости для CO_2 и C_3H_8 ;
- 4) Определить зависимость времени и пути испарения частицы реагента от температуры облака и построить графики зависимости для CO_2 и C_3H_8 ;
- 5) Установить зависимость времени от пути испарения частицы реагента от ее размера и построить графики зависимости для CO_2 и C_3H_8 ;

Предметом исследования являются процессы, происходящие вокруг хладореагентов (CO_2 , C_3H_8), при различных состояниях атмосферы.

Структура выпускной работы: работа состоит из введения, трёх глав, которые разделены на подглавы, заключения, списка использованной литературы и приложения.

Первая глава посвящена основным теоретическим аспектам исследования облаков и осадков. Вторая глава посвящена методам воздействий на атмосферные процессы. Третья глава посвящена анализу процессов, происходящих вокруг частицы реагента при различных параметрах атмосферы.

1 Теоретические аспекты исследования облаков и осадков

1.1 Образование облаков и их классификация

Облака — это сконденсированный водяной пар в атмосфере, видимый с Земли и из космоса. Они состоят из облачных элементов: крошечных капель воды и/или кристаллов льда. Состав облаков зависит от температуры: жидкие при температуре выше -10°C , смешанные при температуре от -10°C до -15°C и ледяные при температуре ниже -15°C .

На (рис.1.) изображена молекула воды (H_2O), где О - атом кислорода, Н - атомы водорода. Линии между атомами обозначают химические связи [1].

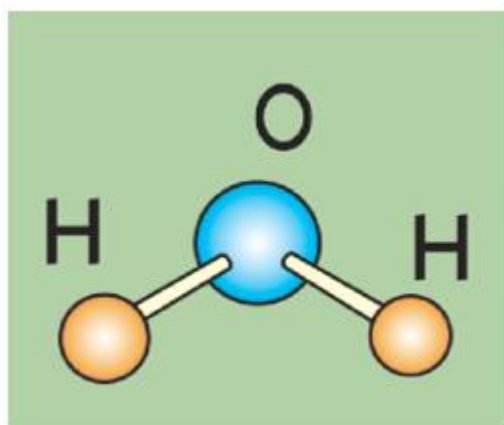


Рисунок 1. Молекула воды

В зависимости от способа формирования облака можно разделить на три основных генетических типа:

- Облака, образующиеся в пределах одной воздушной массы (например, в результате конвекции или в стабильном воздухе).
- Облака, образующиеся в результате взаимодействия воздушных масс вдоль фронта (фронтальные).
- Другие типы облаков.

Облака конвекции возникают в результате охлаждения воздуха в вертикальных восходящих потоках (рис.2.). В первой стадии развития термической конвекции, когда она является лишь разновидностью турбулентного движения, это плоские кучевые облака, а также разорвано-кучевые; при возникновении хорошо оформленных восходящих токов значительной скорости (3,6 м/с и более) возникают мощные кучевые и кучево-дождевые облака.

Кучево-дождевые (конвективные) облака представляют собой изолированные, вертикально развивающиеся массы. Неравномерное нагревание поверхности создаёт восходящие потоки, которые конденсируются в более холодном воздухе, образуя эти облака. Отдельные конвективные ячейки существуют менее 20 минут, но продолжительность жизни облака может достигать часа при наличии нескольких ячеек. [2].

Конвективные облака состоят из струйных или термических потоков. Диаметр этих потоков у земли в среднем составляет 60 м, а их концентрация — 40 потоков на км². В кучево-дождевых облаках эти конвективные потоки крупнее ($d \sim 90$ м), чем внизу ($d \sim 50$ м).

Динамическая конвекция обусловлена вынужденным подъемом теплого воздуха при обтекании препятствия. Роль препятствия может выполнять горный хребет или фронтальная поверхность с крутым углом наклона. Облака конвекции носят название кучевообразных. Облака конвекции развиваются в неустойчивых воздушных массах:

- в холодных воздушных массах,двигающихся над теплой поверхностью;
- местных воздушных массах над сушей летом.

Облака устойчивых воздушных масс возникают в связи с охлаждением воздуха от подстилающей поверхности, динамической турбулентностью и волновыми движениями в атмосфере. К этому подтипу облаков относятся слоистые, слоисто-кучевые и высоко-кучевые. Они имеют выраженную волнистую структуру, поэтому носят название волнистообразных.

Динамическая конвекция возникает, когда тёплый воздух поднимается вверх из-за препятствия, такого как гора или крутой атмосферный фронт. Такое вынужденное восхождение создаёт кучевые облака. Такие условия характерны для нестабильных воздушных масс, особенно когда:

- Холодный воздух движется над более тёплой поверхностью.
- Летом над сушей нагреваются местные воздушные массы.

Напротив, облака в стабильных воздушных массах образуются из-за охлаждения поверхности, атмосферной турбулентности и наличия атмосферных волн.

Обширные облачные системы, простирающиеся на тысячи километров вдоль фронтальной границы и на сотни километров в ширину, образуются, когда тёплый воздух плавно поднимается над клином более холодного воздуха. Такие облака известны как облака восходящего скольжения. Фронт обозначает границу между неглубоким слоем холодного воздуха и более тёплым воздухом, расположенным рядом с ним и над ним. Когда тёплый воздух медленно поднимается над клином холодного воздуха, он адиабатически охлаждается, что приводит к конденсации водяного пара. В результате этого процесса образуется толстый слой обширных, слоистых (стратифицированных) фронтальных облаков.

Самую большую толщину (несколько километров) имеют слоисто-дождевые облака. Дальше от линии фронта они сменяются высоко-слоистыми, перисто-слоистыми. На расстоянии многих сотен километров от линии фронта наблюдаются гряды перистых облаков. Фронтальные облака могут усиливаться при приближении фронта к горному хребту [2].

На (рис 2.) представлено три типа осадков по происхождению:

1. Конвективные осадки: показана облачность с осадками, от земли вверх идут стрелки, обозначающие подъем теплого воздуха.
2. Фронтальные осадки: показана граница (фронт) между теплым воздухом (ТВ) и холодным воздухом (ХВ). Теплый воздух

поднимается над холодным, что приводит к образованию облаков и осадков.

3. Орографические осадки: показаны горы. Воздушные массы поднимаются вверх по склонам гор, охлаждаются, что приводит к конденсации и образованию осадков [3].

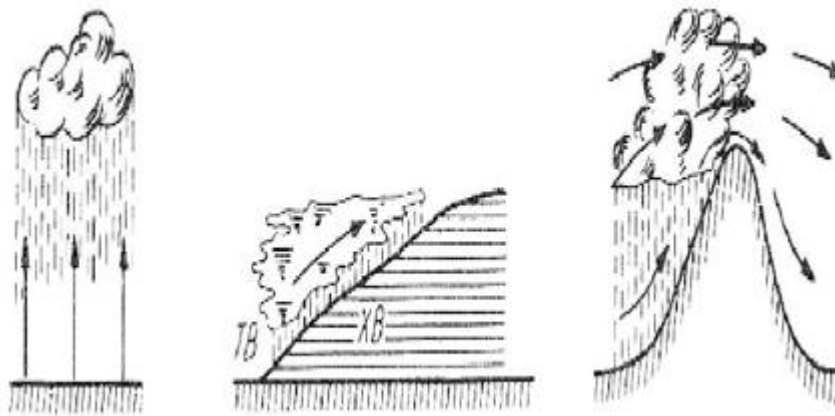


Рисунок 2. Образование облаков: конвективные, фронтальные, орографические

Обычно облака наблюдаются в тропосфере. Помимо наиболее часто встречающихся типов облаков, в атмосфере иногда образуются перламутровые облака, которые формируются на высоте от 20 до 25 километров, и серебристые облака, которые встречаются гораздо выше, на высоте около 85 километров.

В (табл. 1) представлена международная классификация облаков.

Таблица 1. Международная классификация облаков

Международная классификация облаков

Название форм облаков		Сокращенное обозначение	Средняя высота, км
русское	латинское		
Облака верхнего яруса (высота основания более 6 км)			
I. Перистые	Циррус <i>cirrus</i>	Ci	7–8
II. Перисто-кучевые	Циррокумулус <i>cirrocumulus</i>	Cc	6–8
III. Перисто-слоистые	Цирростратус <i>cirrostratus</i>	Cs	6–8
Облака среднего яруса (высота основания 2–6 км)			
IV. Высоко-кучевые	Альтокумулус <i>altocumulus</i>	Ac	2–6
V. Высоко-слоистые	Альтостратус <i>altostratus</i>	As	3–5
Облака нижнего яруса (высота основания ниже 2 км)			
VI. Слоисто-кучевые	Стратокумулус <i>stratocumulus</i>	Sc	0,8–1,5
VII. Слоистые	Стратус <i>stratus</i>	St	0,1–0,7
VIII. Слоисто-дождевые	Нимбостратус <i>nimbostratus</i>	Ns	0,1–1,0
Облака вертикального развития (с основанием ниже 2 км и вершинами, достигающими среднего и верхнего ярусов)			
IX. Кучевые	Кумулус <i>cumulus</i>	Cu	0,8–1,5
X. Кучево-дождевые	Кумулониimbus <i>cumulonimbus</i>	Cb	0,4–10

Перистые облака, находящиеся в верхней части тропосферы (обычно на высоте 6–8 км в средних широтах, 6–18 км в тропиках и 3–8 км в полярных регионах), характеризуются тонкими нитевидными образованиями или пятнами белого (или преимущественно белого) цвета, расположенными в виде полос или лент. Они имеют волокнистую структуру и/или шелковистый блеск, а видимость внутри облака составляет от 150 до 500 метров. Перистые облака, состоящие из относительно крупных кристаллов льда, которые падают с заметной скоростью, могут простирались в высоту от сотен метров до нескольких километров. Сдвиг ветра и различия в размерах кристаллов приводят к характерному искривлению и изогнутости облачных нитей. Из-за своей фрагментарной природы и небольшого размера отдельных облачных образований перистые облака обычно не создают чётко выраженных ореолов. Эти облака часто появляются на переднем крае тёплого фронта или окклюзионной фронтальной облачной системы, связанной с тёплым воздухом, поднимающимся вверх.

Перисто-кучевые облака — это очень высокие, маленькие, округлые облака, расположенные рядами, часто напоминающие рябь на песке. Они образуются на высоте 6–8 км и простираются в высоту до 1 км, видимость в них составляет от 200 до 500 метров. Их появление часто указывает на повышение температуры, и они часто сопровождают перистые или перисто-слоистые облака. Перисто-кучевые облака часто предшествуют штормам и могут переливаться (по краям они окрашены в радужные цвета). Они не отбрасывают тень даже со стороны, противоположной солнцу. Они состоят из кристаллов льда и образуются в результате волнообразных и восходящих движений воздуха в верхней части тропосферы

Перисто-слоистые облака, состоящие из кристаллов льда, — это высотные облака, напоминающие гладкую пелену на небе. Расположенные на высоте 6–8 км, они могут иметь толщину от сотен метров до нескольких километров (2–6 км), а видимость в них составляет от 50 до 200 метров. Эти облака достаточно прозрачны, чтобы сквозь них можно было отчётливо видеть солнце или луну. Обычно перистые облака образуются в результате крупномасштабного подъёма воздуха из-за конвергенции на нескольких уровнях в атмосфере. Перистые облака часто ассоциируются с образованием ореолов вокруг Солнца или Луны. Эти ореолы возникают из-за преломления света кристаллами льда в облаке.

Высококучевые облака (Ac) часто встречаются в тёплое время года и на высоте 2–6 км, их высота составляет несколько сотен метров, а видимость внутри них ограничена 50–80 м. Как правило, они располагаются над областями, обращёнными к солнцу.

Слоисто-кучевые облака часто образуются, когда поднимается тёплый воздух или, когда надвигается холодный фронт, который выталкивает тёплый воздух вверх. Появление таких облаков в тёплое влажное летнее утро часто предвещает приближение грозы или изменение погодных условий.

Высокослоистые облака, напротив, выглядят как однородный или слегка волнистый слой серого или голубоватого цвета. Их основание находится на

высоте 3–5 км, вертикальная протяжённость составляет 1–4 км, а видимость внутри очень плохая (25–40 м). Эти облака состоят из кристаллов льда, переохлаждённых капель воды и снежинок. [2].

Слоисто-дождевые облака имеют тёмно-серый цвет и образуют сплошной плотный слой. Во время осадков они выглядят однородными, но с промежутками, в которых может быть заметна неровность или волнистость. Они темнее и более голубоватые, чем слоисто-кучевые облака, имеют менее однородную структуру и всегда вызывают устойчивые осадки. Их основание находится на высоте от 100 до 1900 метров, а толщина составляет несколько километров.

Слоистые облака создают равномерный, похожий на туман слой, но находятся выше земли (обычно на высоте 100–400 м, иногда 30–90 м). Обычно они покрывают всё небо, хотя могут выглядеть как разрозненные массы. Основание этих облаков может быть очень низким, даже сливаться с наземным туманом. Они относительно тонкие, толщиной от десятков до сотен метров, и могут вызывать лёгкие осадки, такие как снежинки или морось.

Кучевые облака — это плотные, ярко-белые облака со значительным вертикальным развитием. Основание на высоте от 800 до 1500 метров, иногда 2-3 км или выше. Их толщина составляет 1-2 км, иногда 3-5 км. . Кучевые облака обычно образуются в результате конвекции в холодных или нейтральных воздушных массах.

Кучево-дождевые облака — это высокие и плотные облака с сильным вертикальным развитием (несколько километров, до 12–14 км), из которых выпадают обильные ливневые осадки, в том числе крупный град и случаются грозы. Эти облака развиваются из больших кучевых облаков и могут образовывать линию шквала. Нижние слои кучево-дождевых облаков в основном состоят из капель воды, а верхние слои, где температура намного ниже, — преимущественно из кристаллов льда. Их основание обычно находится на высоте менее 2000 метров, в нижней части тропосферы. [2].

1.2 Микроструктура и водность облаков

По своему составу облака можно разделить на три типа:

- Водяные (капельные) облака: состоят исключительно из капель воды (рис.3).
- Смешанные облака: содержат смесь переохлажденных капель воды и кристаллов льда.
- Ледяные (кристаллические) облака: полностью состоят из кристаллов льда.

Облака могут оставаться чисто жидкими (состоящими из капель воды) при температуре до -10°C . При более низких температурах присутствуют как капли воды, так и кристаллы льда, что приводит к образованию смешанных облаков. Самые высокие тропосферные облака, встречающиеся при температуре от -30 до -50°C , обычно полностью состоят из кристаллов льда.

Размер капель в облаках варьируется от долей микрона до сотен микрон. В зависимости от стадии формирования и развития облака могут содержать капли относительно одинакового размера или капли разных размеров. В результате конденсации капли могут увеличиваться в размере до 20 микрометров. Однако таяние кристаллов льда и слияние капель могут привести к образованию более крупных капель радиусом до 100–200 микрометров. При таких размерах капли начинают выпадать в виде мороси или дождя [2].

Кристаллы льда в облаках также имеют разнообразную форму и размер. При замерзании капель при низких температурах образуются «полноценные кристаллы» — шестиугольные пластины или призмы льда диаметром 10–20 мкм. Дальнейшая сублимация (кристаллизация) приводит к росту этих кристаллов, которые могут разветвляться по углам (лучам). Эти разветвления могут развиваться дальше, образуя сложные и разнообразные структуры, такие как шестиконечные звёздчатые кристаллы (снежинки).

Концентрация капель в облаках в объёме воздуха относительно невелика: от сотен на кубический сантиметр в нижней части тропосферы до нескольких на кубический сантиметр в верхних слоях. Концентрация кристаллов льда в облаках ещё ниже, обычно около 0,1 на кубический сантиметр.

Содержание воды в облаке — это количество жидкой или твёрдой воды, присутствующей в облаке. Несмотря на то, что в облачном воздухе содержится множество капель или кристаллов, их небольшой размер означает, что общее содержание воды относительно низкое. В облаках на водной основе обычно содержится от 0,2 до 5 граммов воды на кубический метр облачного воздуха. В облаках на ледяной основе содержание воды значительно меньше, часто всего лишь сотые или тысячные доли грамма на кубический метр.

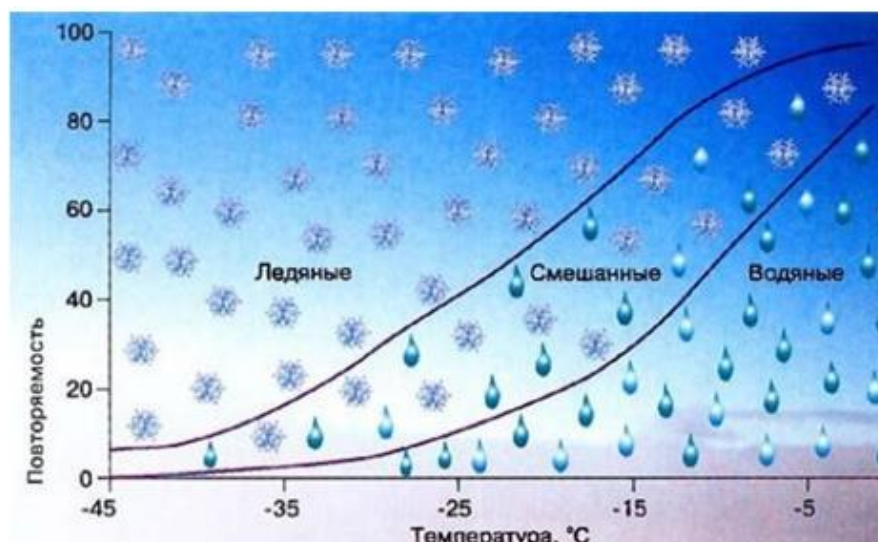


Рисунок 3. Микроструктура облаков

Количество водяного пара в воздухе, известное как абсолютная влажность, довольно низкое и измеряется в граммах на кубический метр, а в более высоких и холодных слоях атмосферы оно ещё ниже (доли грамма). При конденсации только часть водяного пара превращается в жидкость. В результате содержание воды в облаках (облачное содержание воды) даже ниже, чем абсолютная влажность окружающего воздуха. [2].

1.3 Типы осадков и их классификация

Атмосферные осадки — это вода в жидком или твёрдом состоянии, выпадающая из облаков на поверхность Земли или осаждающаяся непосредственно из атмосферы на поверхность. Осадки являются важнейшим компонентом круговорота воды на Земле. Они измеряются количеством воды, скапливающейся на горизонтальной поверхности, и выражаются в виде толщины слоя воды. Твёрдые осадки также характеризуются толщиной слоя воды, который образуется при их таянии. Слой воды толщиной 1 мм имеет массу 1 кг на квадратный метр площади поверхности.

- Осадки измеряются на гидрометеорологических станциях с помощью таких приборов, как:
- Дождемеры (приборы для измерения осадков): собирают осадки в ёмкость (ведро) с определённой площадью отверстия.
- Плювиографы: непрерывно регистрируют количество осадков с течением времени.
- Суммирование показаний дождемеров: измерение общего количества осадков за длительный период.

На больших территориях радар используется для измерения интенсивности и количества осадков, выпадающих из различных типов облаков, а также их суточных, сезонных и региональных колебаний. Важной характеристикой является интенсивность осадков, то есть количество осадков в единицу времени (мм/мин, мм/день и т. д.). Для характеристики климата региона рассчитываются среднемесячные, среднегодовые и общегодовые суммы осадков. [4].

Осадки выпадают, когда элементы облака (капли или кристаллы) увеличиваются в размерах и в конечном итоге набирают достаточную массу, чтобы выпасть из облака. Крупные кристаллы льда, падая сквозь облако, могут сталкиваться с переохлаждёнными каплями, в результате чего капли замерзают на кристаллах или слипаются друг с другом. Попадая в слой

воздуха с температурой выше 0°C , эти замёрзшие частицы тают, образуя капли дождя. При более низких температурах (около 0°C или ниже) замёрзшие частицы достигают земли, не тая, что приводит к выпадению снега, слякоти или других видов замёрзших осадков. Град может выпадать в тёплое время года. В облаках, состоящих из жидкой воды, осадки могут образовываться в результате столкновения и слияния (коалесценции) облачных элементов при положительных температурах или чуть ниже 0°C . В результате этого процесса может выпадать небольшой дождь или морось.

На (рис.4.) представлен круговорот воды в природе и такие этапы как: испарение воды из океана, конденсация пара и образование облаков, а также осадки в виде дождя и снега [5].



Рисунок 4. Образование осадков

Дождь состоит из капель воды диаметром от 0,5 до 6–7 мм. Более крупные капли, как правило, распадаются на части, потому что баланс между поверхностным натяжением и сопротивлением воздуха во время падения не позволяет им сохранять стабильную форму. Скорость падения дождевых капель варьируется от 0,25 до 100 мм/ч. .

Морось — это лёгкое выпадение осадков в виде мелких, медленно падающих капель воды (диаметром менее 0,5 мм), которые обычно

образуются в низко расположенных слоисто-кучевых или слоисто-слоистых облаках.

Снег состоит из твёрдых кристаллов льда, выпадающих в различных формах, включая снежинки, ледяные иглы, столбики и пластины. Все снежные образования основаны на шестиугольной структуре кристаллов льда. Во время сильных снегопадов, лёгкого ветра и относительно тёплой температуры воздуха снежинки часто слипаются, образуя более крупные хлопья диаметром от 5 до 15–20 мм.

Мокрый снег — это смесь снежинок и капель дождя, часто состоящая из тающих снежинок. Он образуется, когда температура воздуха в слое под облаком выше 0°C.

Крупа — это твёрдые осадки, выпадающие из облаков в виде непрозрачных белых снежных крупинок неправильной округлой формы диаметром от 2 до 15 мм. При ударе о твёрдую поверхность эти крупинки отскакивают, не раскалываясь. В зависимости от соотношения снега и льда в крупинках этот тип осадков подразделяется на снежные зёрна, ледяные крупинки или снежные шарики.

Град — это твёрдые осадки в виде частиц льда, или градин, которые образуются во время сильных гроз. Градины образуются в результате многократного замерзания переохлаждённых капель воды, которые поднимаются и опускаются в сильных восходящих и нисходящих потоках воздуха во время грозы. [2].

Для низкотехнологичных методов измерения осадков используется контейнер с плоским дном и прямыми сторонами. В то время как цилиндр может помочь вам определить, является ли выпавший осадок в один или два дюйма дождя, им трудно измерить небольшое количество осадков.

Наблюдатели погоды используют более сложные инструменты, известные как датчики дождя и чаевые ведра для более точного измерения осадков. Дождь датчики имеют широкие отверстия в верхней части для осадков. Дождь направляется в узкую трубку, в одну десятую диаметра

верхней части горловины. Поскольку труба тоньше, чем верхняя часть воронки, единицы измерения дальше друг от друга, чем они были бы на линейке и возможны точные измерения на одну сотую ($1/100$ или $0,01$) дюйма. Когда показатель менее чем $0,01$ дюйма дождя, эта сумма называется «след» дождя [4].

2 Методы воздействий на атмосферные процессы

2.1 Реагенты для воздействия на облака

Для засева стратосферных облаков обычно используются такие реагенты, как гранулированный твёрдый углекислый газ (CO_2 , или «сухой лёд»), йодид серебра (AgI) и жидкий азот (N_2). Твёрдый углекислый газ остаётся наиболее часто используемым реагентом. Благодаря низкой температуре сублимации (-79°C) сухой лёд действует как охлаждающий реагент. Когда гранулы сухого льда попадают в облако, сильное охлаждение создаёт перенасыщение водяного пара в окружающей среде, что приводит к спонтанному образованию крошечных кристаллов льда. Некоторые из этих кристаллов разрушаются, улетая от гранул, в то время как другие продолжают расти. При сублимации в слоисто-кучевых облаках из 1 грамма сухого льда образуется 10^{11} таких «выживших» ледяных частиц. Максимальная температура окружающей среды в облаке, при которой всё ещё образуется такое же количество ледяных частиц (температурный порог активности), составляет -4°C . Это означает, что облака с более тёплой верхней границей непригодны для засева сухим льдом.

Йодистое серебро — ещё один широко используемый реагент для засева слоисто-кучевых облаков. Его кристаллическая структура похожа на структуру льда, что позволяет водяному пару сублимироваться на частицах йодистого серебра, когда воздух перенасыщен льдом. Капли воды,

соприкасающиеся с йодистом серебра, также замерзают. Количество образующихся частиц льда зависит от температуры облака и способа распыления реагента. Например, при сжигании пиротехнической шашки PV-26-01, содержащей 8% йодистого серебра, при температуре -10°C образуется 2×10^{14} частиц льда. Максимальная температура, при которой образуется достаточное количество частиц льда, чтобы заметно повлиять на образование осадков (температурный порог активности йодистого серебра), составляет -7°C . Остальные условия для засева облаков йодистым серебром такие же, как и для использования твёрдого диоксида углерода. [10].

Применение жидкого азота для засева облаков при АВ с целью метеозащиты также основывается на использовании низкой температуры его испарения (ниже минус 90°C) для глубокого охлаждения облачной среды с переохлажденными каплями, при котором происходит генерация мелкодисперсных ледяных частиц. При этом в отличие от засева гранулами твердой уголекислоты генерация ледяных частиц происходит не во всей толще засеваемого облачного слоя, а лишь в относительно тонком слое на уровне полета самолета, на котором установлено засевающее устройство. Поэтому жидкий азот пока используется на практике лишь для засева относительно тонких переохлажденных облачных слоев или как дополнительное средство при засеве облаков йодистым серебром и твердой уголекислотой. Одновременно продолжаются работы по созданию метода объемного засева облаков на основе использования жидкого азота. Преимуществами засева облаков с использованием жидкого азота являются его наиболее высокий среди всех реагентов температурный порог активности, составляющий около минус $0,5^{\circ}\text{C}$, и абсолютная экологическая безопасность. В качестве реагента в работах по подавлению развития конвективных облаков используется грубодисперсный порошкообразный реагент. Исследования показали, что эффективность действия порошкообразного реагента существенно зависит от состава порошка, его гидрофильности, удельного веса и дисперсности. Очень

грубый или слишком тонкий помол приводят к снижению эффективности действия реагента

Оптимальная дисперсность порошка (суммарная поверхность всех частиц единицы его веса), обеспечивающая наиболее высокую степень увлечения падающим аэрозольным облаком окружающего воздуха и облачной массы, составляет примерно 3000 см²/г. Этому значению дисперсности соответствует средний размер частиц примерно около 5 мкм. Наиболее полно указанным свойствам соответствует обычный строительный цемент, состоящий из природных глиноземов с 4%-ной добавкой гипса. Кроме цемента в качестве реагентов могут использоваться 12 РД 52.11.677-2006 также белая глина, окись меди, песок с дисперсностью около 3000 см²/г. Оптимальные нормы расхода порошкообразного реагента были определены экспериментальным путем. Многочисленные опыты с АВ на облака мощностью 1 км показали, что достаточной нормой реагента для их засева оказываются 5 кг порошка. Для мощно-кучевых и кучево-дождевых облаков нормы расхода реагента возрастают и обычно составляют для изолированного облака 25-30 кг.

2.2 Технические средства для исследования эффективности методов активных воздействий

Лабораторный стенд для испытаний, кристаллизующих реагентов. Стенд предназначен для проведения испытаний кристаллизующих реагентов, применяемых в практике активных воздействий, на их льдообразующую эффективность. Основной частью стенда является малая климатическая камера TSW-300 производства Германии объемом 300 литров (рис.5.). В камере создается температурный режим от минус 25 до 25 °С [15].

Камера оснащена вентилятором для перемешивания воздуха и выравнивания концентрации частиц; осветительным устройством для визуального наблюдения за процессом образования тумана и изменением его фазового состояния; заборником проб кристаллов для улавливания образующихся ледяных кристаллов на дне камеры; ртутным термометром с ценой деления 0,2 °С.

В состав стенда также входит:

- аэрозольная камера объемом 800л с автономной системой очистки;
- парогенератор мощностью 600 Вт;
- весы электронные ВСЛ-60/0,1А с ценой деления 0,1 мг;
- шприцы вместимостью от 20 до 250 см³ для дозирования проб аэрозолей;
- микроскоп с увеличением до 200 раз;
- пульт управления устройствами внутри камеры и парогенератором.



Рисунок 5. Малая климатическая камера TSW-300.

Лабораторный стенд для моделирования облаков, туманов и проведения климатических испытаний приборных комплексов.

Стенд предназначен для:

- Моделирования процесса образования теплых и переохлажденных облачных сред;
- Моделирования процессов воздействий на модельные облачные среды;
- Моделирование климатических условий в широком диапазоне температур и влажности;
- Проведения испытаний и калибровок самолетных и наземных приборных комплексов.

Основу стенда составляет климатическая камера модели MHW- 6JK фирмы TERCHY с полезным объемом 12 м³(рис.6.).

- Диапазон температур в рабочей камере от -60 °С до +60 °С.
- Точность поддержания температуры $\pm 0,5$ °С.
- Неравномерность распределения температуры по объему ± 1 °С.
- Скорость изменения температуры 1/1 °С/мин.
- Диапазон влажности 20 - 95%.
- Точность поддержания влажности $\pm 2,5$ %.
- Неравномерность распределения влажности по объему ± 5 %.

Камера оборудована 12-ти канальным, высокоточным измерителем температуры среды по объему камеры, 3-х канальным фотоэлектрическим измерителем оптической плотности капельного тумана.

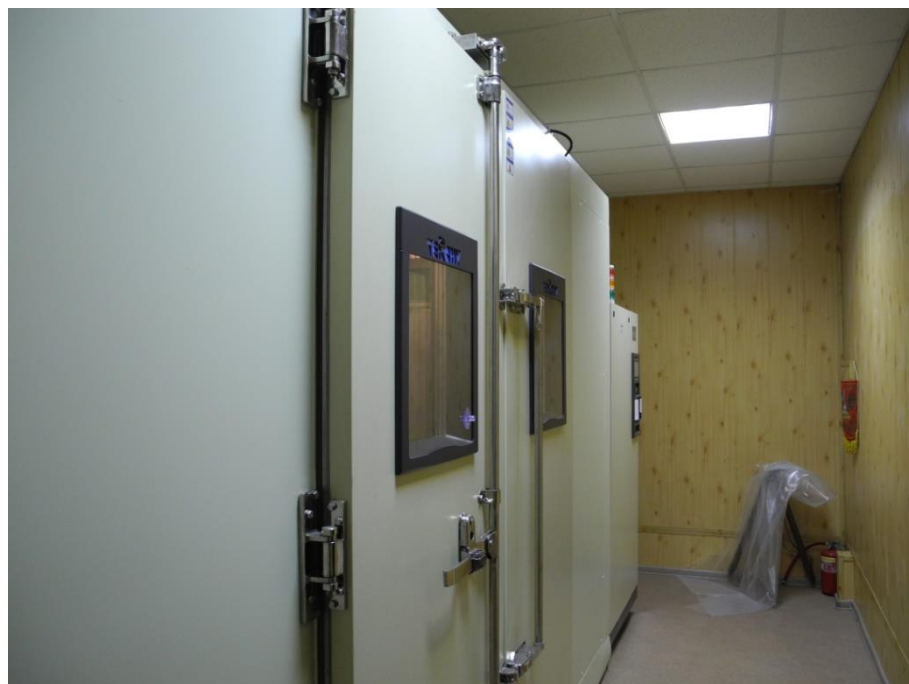


Рисунок 6. Климатическая камера МНВ- 6JK.

В состав стенда также входит:

- Парогенератор ЭПэ – 5 – ПМР производительностью 50 кг пара в час.
- Устройство для исследования спектра частиц модельной облачной среды на базе скоростной цифровой видеокамера и лазерного модуля
- Устройство с дистанционным управлением для забора кристаллов и капель на предметные стекла.

2.3 Технические средства для активных воздействий на облака

Для внесения реагентов в облака используются самолеты, оборудованные соответствующими техническими устройствами и приборами. Засев облаков с самолета твердой углекислотой выполняется с помощью специальных устройств через предусмотренные для этого отверстия в виде шахт в корпусе самолета. В разные периоды для этого использовалось несколько видов экспериментальных автоматических устройств, обеспечивающих дозированный сброс в облака гранул твердой углекислоты с расходом от 0,1 до 10 кг/мин.

Гранулы сухого льда размером от 0,2 до 2,0 см получают либо на борту самолёта путём измельчения предварительно загруженных промышленных блоков сухого льда (с помощью такого оборудования, как автоматическая раздаточная установка ADG-1), либо на земле с помощью специализированных систем, преобразующих промышленный жидкий углекислый газ в твёрдую форму. Перед использованием эти гранулы (или исходные блоки) хранятся в термоизолированных контейнерах на борту самолёта. Затем гранулы распыляются в атмосферу через специально предусмотренные отверстия в фюзеляже самолёта. Такое распыление осуществляется с помощью механизмов с бункером или шнеком, а также специальных дозирующих устройств, таких как SDU (авиационное дозирующее устройство), разработанное для самолёта-лаборатории ЦАО АН-26 «Циклон». (рис. 7).



Рисунок 7. Устройства для выброса твердой углекислоты с самолета Ан-30

Способность охлаждающих агентов вызывать образование кристаллов льда была тщательно изучена как в контролируемых лабораторных условиях, так и в ходе реальных полевых экспериментов. Твердый углекислый газ и жидкий азот оказались наиболее эффективными вариантами и широко используются при засеве облаков. Был установлен максимальный потенциал для образования кристаллов льда с помощью этих агентов, а также разработано специальное оборудование для использования как на самолетах, так и на земле для засева переохлажденных облаков.

В облаке твёрдая углекислота с температурой сублимации $-78,9^{\circ}\text{C}$ создаёт интенсивное охлаждение. Это охлаждение приводит к тому, что водяной пар становится сильно перенасыщенным, что приводит к спонтанному образованию множества крошечных кристаллов льда. По оценкам, из 1 грамма сублимирующегося сухого льда образуется примерно 10^{11} частиц льда. Однако этот процесс эффективен только в облаках с температурой от -3 до -4°C или ниже, что является температурным порогом для активности твёрдой углекислоты. [12].

Засеивание облаков углекислотой предполагает его введение в облако либо путём сброса с самолёта небольших кусочков (или гранул) сухого льда, либо путём рассеивания мелких частиц CO_2 , образующихся при выбросе в воздух потока жидкого углекислого газа из резервуаров. Наиболее часто используемый метод засеивания облаков заключается в засеивании переохлаждённых облаков гранулированной твёрдой углекислотой г. Этот метод имеет ключевое преимущество: гранулы выбрасываются, когда самолёт находится выше верхней границы облака, что сводит к минимуму риск обледенения самолёта. Кроме того, контроль размера гранул и дозировки позволяет эффективно засеивать всю площадь облака.

Блоки сухого льда превращаются в гранулы либо перед полетом, на земле, либо в полёте с помощью такого оборудования, как уже устаревшая автоматическая раздаточная установка ADG-1.

В прошлом, особенно до появления гранулированной формы, широко использовался дроблёный сухой лёд, но с распространением гранулированного сухого льда он практически перестал применяться в операциях по модификации облаков и туманов. Это связано с неравномерным распределением по размеру получаемых в результате дробления фрагментов и значительным количеством отходов, образующихся в процессе. В настоящее время твёрдый углекислый газ в основном используется в виде гранул, обычно диаметром 8–10 мм и длиной 10–30 мм.

Засеивание облаков йодистым серебром предполагает использование самолётов, оснащённых такими системами, как АСО-2И, для запуска пиротехнических ракет с йодистым серебром ПВ-26-01 (рис.8.). Автоматическое устройство для отстрела пиропатронов ПВ-26-01 АСО-2И состоит из двух балок, в каждой из которых имеется по 32 ствола-держателя пиропатронов 26-миллиметрового калибра, и системы управления, которая предусматривает как отстрел единичных пиропатронов, так и отстрел пиропатронов сериями по 4 штуки с регулируемым интервалом внутри серии от 0,3 до 1,0 с.



Рисунок 8. Патрон ПВ-26-01

Каждая пиротехническая сигнальная ракета ПВ-26-01 весом около 30 граммов горит примерно минуту (60 секунд) и оставляет за собой след длиной 1500 метров.

Для засева облаков мелкодисперсными ледяными частицами с использованием жидкого азота в ЦАО был разработан генератор мелкодисперсных частиц льда авиационный (ГМЧЛ-А) (рис.9.). Принцип действия ГМЧЛ-А заключается в том, что путем создания избыточного давления в емкостях с жидким азотом обеспечивается подача азота по системе трубопроводов в установленный за бортом самолета распылитель, через который он выводится в атмосферу и создает в ней факел глубоко охлажденного воздуха с температурой ниже минус 90 °C[12].



Рисунок 9. Самолетный азотный генератор ГМЧЛ-А

Атмосферная влага, попадающая в этот факел, мгновенно кристаллизуется за счет сильного охлаждения. Система ГМЧЛА-А вмещает 96 кг жидкого азота, но при необходимости в самолёт можно добавить ещё больше с помощью стандартных контейнеров SK-40 (Дьюар)

Для АВ на облака в настоящее время применяются самолеты-метеолaborатории, создаваемые на базе серийных самолетов типа Ил-18(Рис.10.), Ан-12, Ан-26, Ан-30, Ан-72, Як-40, М-101Т («Гжель»). Самолеты оснащаются необходимыми техническими средствами засева облаков, а также приборами и оборудованием для измерения пилотажно-навигационных характеристик полета, основных термодинамических параметров атмосферы, оптических и микрофизических характеристик облаков.

Для порционного засева порошкообразного реагента в облака самолеты-метеолaborатории оборудуются специальными устройствами, позволяющими производить сброс реагента в необходимых количествах. На самолетах типа Ан-12, в подавляющем большинстве случаев используемых в настоящее время для АВ описываемого типа, для засева облаков используются упаковки реагента с принудительным раскрытием, которые сбрасываются с самолета-метеолaborатории с помощью рольганговых транспортеров.

Конструктивно упаковка для порошкообразного реагента представляет собой картонный или пенопластовый корпус (с оптимальными размерами

приблизительно 260 x 260 x 380 мм), закрываемый крышкой из того же материала, что и корпус.



Рисунок 10. Самолет Ил-18

В настоящее время йодистое серебро AgI является одним из наиболее широко используемых реагентов для АВ на облака различных типов. В основе использования аэрозолей йодистого серебра в качестве льдообразующего реагента лежит то обстоятельство, что кристаллическая структура AgI аналогична структуре естественного льда. Вследствие этого частицы AgI оказываются такими же эффективными льдообразующими ядрами, как и ледяные частицы. Исследования, проведённые Никандровым и Плаудом, показали, что кристаллы льда образуются на микроскопических частицах аэрозоля йодистого серебра (AgI) в результате сублимации водяного пара, когда воздух насыщен льдом.

Два распространённых метода включают введения аэрозоля йодистого серебра включают в себя: 1) сжигание пиротехнических зарядов, содержащих AgI (так называемые пиротехнические генераторы аэрозоля в воздухе, или генераторов-САГов), прикреплённых к самолёту (рис.11), или 2) сжигание раствора реагента в ацетоне в специально разработанной горелке, установленной снаружи самолёта.



Рисунок 11. Самолетные пиротехнические аэрозольные генераторы,
установленные на крыле самолета

Рисунок 11. Самолетные пиротехнические аэрозольные генераторы,
установленные на крыле самолета

Конструктивно упаковка для порошкообразного реагента представляет собой картонный или пенопластовый корпус (с оптимальными размерами приблизительно 260 x 260 x 380 мм), закрываемый крышкой из того же материала, что и корпус.

Конструкция упаковки предусматривает определенный механизм ее автоматического принудительного раскрытия после сброса с борта самолета. При раскрытии упаковки ее корпус разделяется на небольшие элементы, безопасные как для наземных объектов, так и для воздушных судов. Рольганговый транспортер для сброса упаковок с порошкообразным реагентом состоит из накопителя (рольганговая дорожка с упаковками), механизма сброса и пульта управления.

Каждая упаковка перед сбросом с помощью карабина присоединяется вторым концом прикрепленного к ней фала к фиксатору внутри фюзеляжа самолета. Длина фала обычно составляет около 10 м. Масса каждой упаковки, сбрасываемой с транспортера, составляет от 25 до 30 кг. Минимальный

интервал между последовательными сбросами двух упаковок составляет около 2 с.

3 Анализ процессов, происходящих вокруг частицы реагента при различных параметрах атмосферы

3.1 Природа действия хладореагентов

В практике активного воздействия часто требуется создать большое количество мелких ледяных частиц в переохлажденных облаках или туманах. Для этого в облако вводятся холодные тела, что приводит к снижению окружающей их температуры и увеличению влажности. При достаточно большом перепаде температур влажность может достичь критического уровня. Это способствует самопроизвольному образованию зародышевых капель воды в воздухе, которые затем могут превратиться в ледяные кристаллы. Для охлаждения используются частицы веществ (твердых и жидких), имеющих низкие температуры испарения, так называемые реагенты. Они сохраняют свою низкую температуру до полного испарения [13].

Самым распространенным реагентом является "сухой лед" - твердый углекислый газ CO_2 . Также можно использовать жидкий пропан C_3H_8 . Действие этих охладителей на процесс образования льда заключается в том, что благодаря низкой температуре их поверхности происходит интенсивное охлаждение окружающего воздуха, в результате чего относительная влажность повышается. При достаточно большом перепаде температур влажность может превысить критическую отметку, что создает условия для самопроизвольного образования капель воды и последующего превращения их в ледяные кристаллы.

Поле температуры $T=T(x)$ на разных удалениях x от частицы реагента радиусом R рассчитывается по формуле:

$$\frac{T - T_{\text{обл}}}{T_r - T_{\text{обл}}} = \frac{R}{x} \quad (1)$$

Где $T_{\text{обл}}$ - температура облака, T_r и T_r - температура испарения реагента, K

Пока спонтанная конденсация не началась, содержание водяного пара вокруг частицы реагенты остается постоянным. Относительная влажность может быть рассчитана по формуле:

$$F_{\text{с}} = \frac{e_{\text{обл}}}{E_{\text{пв}}(T)} \quad (2)$$

Если в облаке $F_{\text{обл}}=1$, то $e_{\text{обл}}=E_{\text{пв,обл}}$

Для спонтанной конденсации требуется, чтобы относительная влажность была больше критической ($F > F_{\text{в,кр}}$). Критическая влажность или перенасыщение, при котором начинается спонтанная конденсация рассчитывается по формуле:

$$\ln F_{\text{в,кр}} = 3,33 * 10^5 \left(\frac{\sigma_{\text{пв}}}{T} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

Размер жизнеспособного ледяного зародыша в облаке $r_{\text{л,обл}}^*$ рассчитывается по формуле :

$$r_{\text{л,обл}}^* = \frac{2\sigma_{\text{пл}}}{\rho_{\text{л}} R_{\text{п}} T \ln(f_{\text{л,т}})} \quad (4)$$

Где $R_{\text{п}}$ -газовая постоянная водяного пара, равная 461 Дж/(кг*К);

$\sigma_{\text{пл}}$ – поверхностная энергия натяжения между паром и льдом, зависящая от температуры воздуха $0,103718-8,5*10^{-5}*T$, Дж/м²

$F_{\text{л,т}}$ -относительная влажность воздуха надо льдом ,равная $f_{\text{л,т}} = \frac{E_{\text{пв,обл}}}{E_{\text{пл,обл}}}$

Общее число жизнеспособных зародышей, образующихся при полном испарении частицы реагента

$$n_{\Sigma} = \frac{R^3 D_{\text{п}} P_R \left(\frac{E_{\text{пв,обл}}}{T_{\text{обл}}} - f_{\text{в,кр},R} \frac{E_R}{T_R} \right) L_R}{16,26 \rho_{\text{л}} r_{\text{л,обл}}^*{}^3 \lambda R_{\text{п}} (T_{\text{обл}} - T_R)} \quad (5)$$

Где $D_{\text{п}}$ – коэффициент молекулярной диффузии водяного пара в воздухе, равный $(-1.89725*10^{-5}+1.5*10^{-7}*T)*\frac{101326}{P}$, м²/с;

P – атмосферное давление, Па;

E_R – давление насыщения при температуре испарения реагента, Па;

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, равный $2.42*10^{-2}*[1+2.9*10^{-3}*(T-273.15)]$, Дж/(м*с*К);

ρ_R - плотность реагента, кг/м³;

$\rho_{\text{л}}$ – плотность льда, кг/м³;

L_R – теплота испарения реагента, Дж/кг.

Льдообразующая активность реагента определяется формулой:

$$N_{\text{ЛОАР}} = \frac{n_{\Sigma}}{(4\sqrt{3})\pi r_R^3} \quad (6)$$

Время испарения частицы реагента радиусом R рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{исп}} = 0,16 \frac{\rho_R R^{\frac{5}{4}} \sqrt{v L_R}}{\lambda(T_{\text{обл}} - T_R)}, \quad (7)$$

Где v - климатических коэффициент вязкости воздуха, равный

$$0,135 \cdot 10^{-4} \cdot [1 + 6,5 \cdot 10^{-3} \cdot (T - 273,15)] \cdot \frac{10^5}{p}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Путь, который проходит частицы реагента до полного испарения, рассчитывается по формуле:

$$h_{\text{исп}} \frac{25 p_R R^{7/4} \sqrt{v L_R}}{\lambda(T_{\text{обл}} - T_R)} \quad (8)$$

На (рис.12-13) представлены графики изменения температуры и влажности по мере удаления от частицы реагента CO_2 , построенные по результатам расчетов по формулам (1), (2), (3).

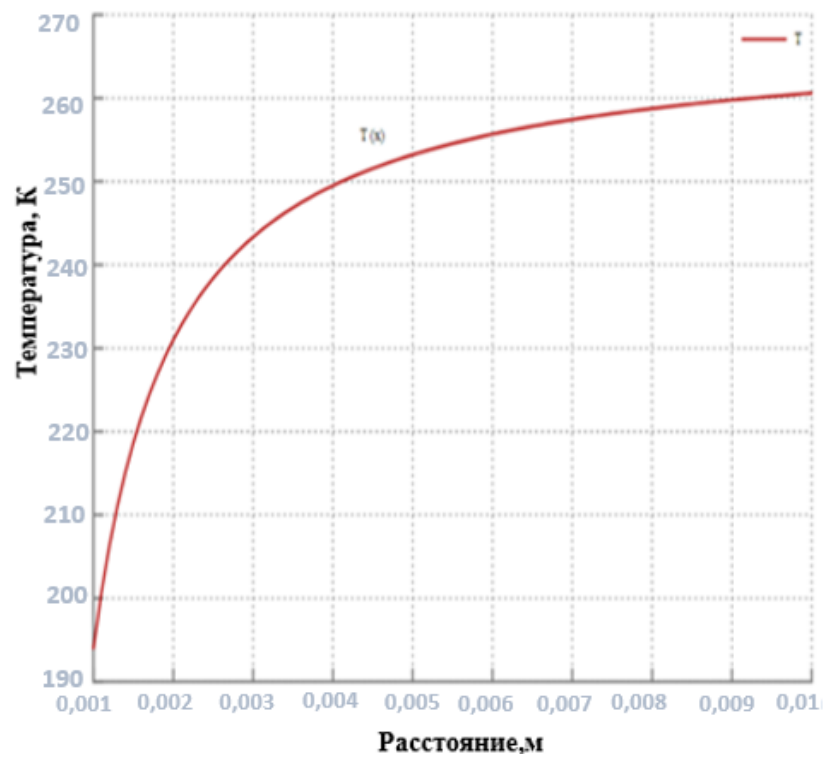


Рисунок 12. График поля температуры для CO_2

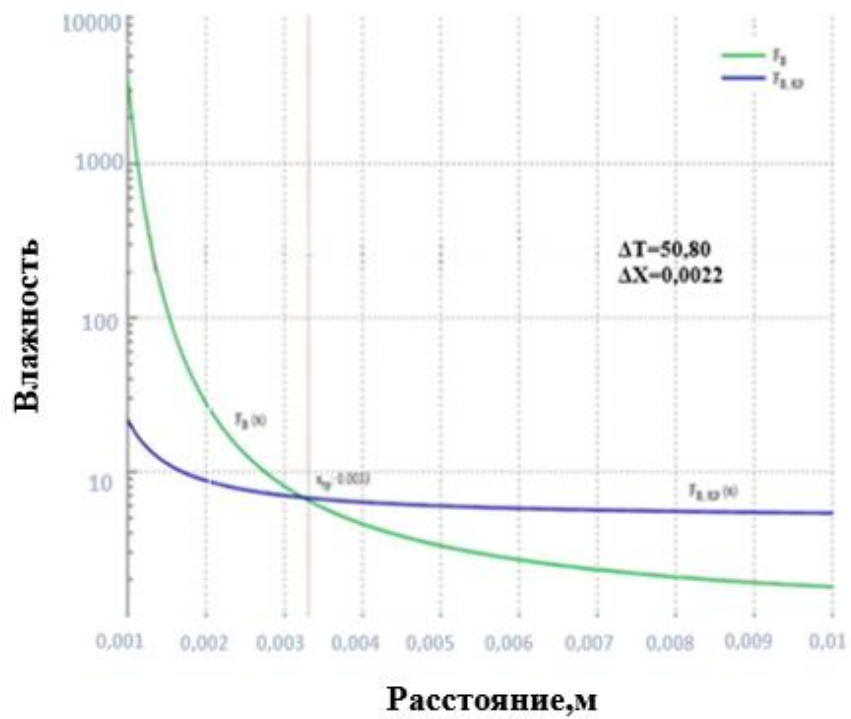


Рисунок 13. График поля влажности для CO_2

С помощью графика находим границу зоны спонтанной конденсации, которая находится на точки пересечения, ширина которой составляет 0,0023 м (2,3 мм).

На (рис.14-15) представлены графики изменения температуры и влажности по мере удаления от частицы реагента C_3H_8 , построенные по результатам расчетов по формулам (1), (2), (3).

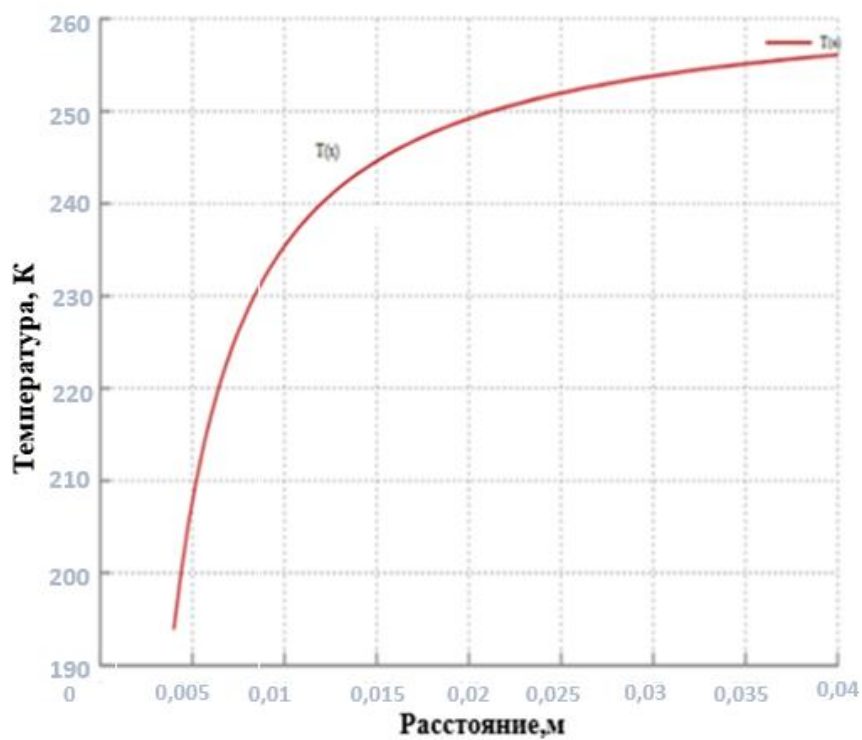


Рисунок 14. График поля температуры для C_3H_8

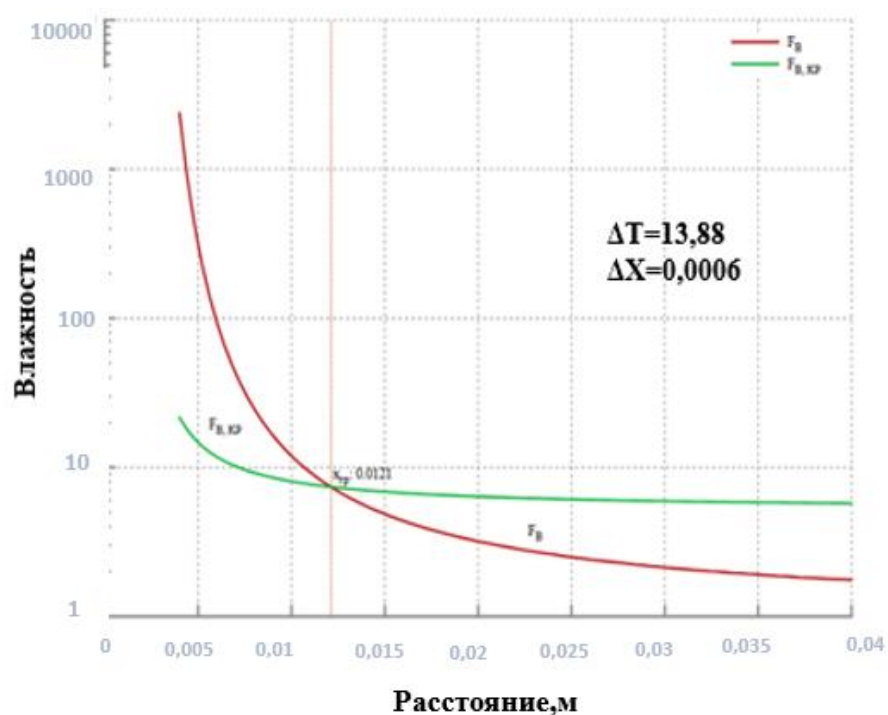


Рисунок 15. График поля влажности для C_3H_8

С помощью графика находим границу зоны спонтанной конденсации, которая находится на точке пересечения, ширина которой составляет 0,0006 м.

Главное отличие между графиками — это положение границы спонтанной конденсации $x_{гр}$. На (рис.15.) $x_{гр}$ значительно смещена влево по сравнению с (рис.13.). Это означает, что условия для спонтанной конденсации достигаются раньше (при меньших значениях x) на графике зависимостей для C_3H_8 , чем на графике для CO_2 .

На (рис.15.) область, в которой возможна конденсация ($x < x_{гр}$), значительно меньше, чем на (рис.13.). Это можно объяснить различными факторами, такими как: изменение профиля температуры, изменение состава воздуха, различия в концентрации ядер конденсации.

На (рис.16-17) представлены графики изменения общего числа ледяных зародышей от температуры облака по результатам расчетов по формуле (5) для реагентов CO_2 , C_3H_8 .

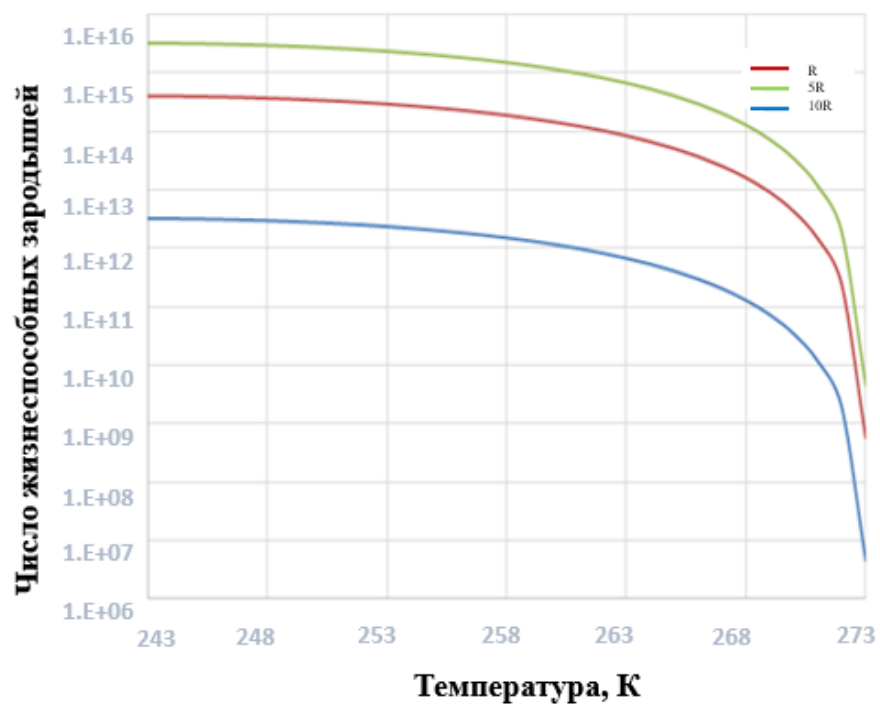


Рисунок 16. График зависимости общего числа жизнеспособных ледяных зародышей от температуры облака для CO_2

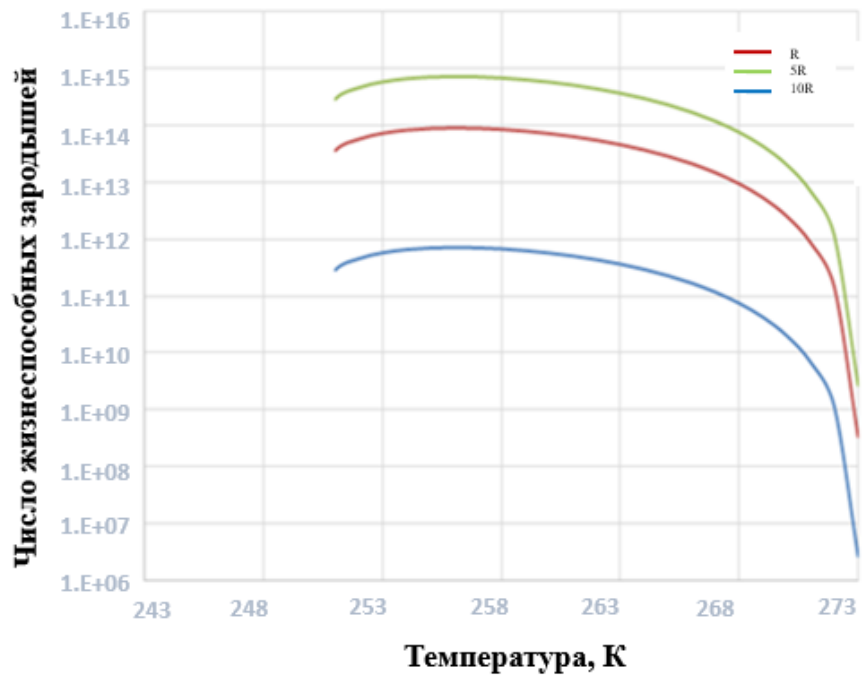


Рисунок 17. График зависимости общего числа жизнеспособных ледяных зародышей от температуры облака для C_3H_8

На (рис.18-19) представлены графики изменения льдообразующей активности от температуры по результатам расчетов по формуле (6) для реагентов CO_2 , C_3H_8 . С удалением от внесенного реагента наблюдается постепенное восстановление исходных параметров окружающей среды: влажность снижается, приближаясь к фоновым значениям, а температура повышается, стремясь к температуре облака.

Зона охлаждения, следующая за областью конденсации, простирается до точки, где температура снова достигает температуры облака. В случае распыления жидкого пропана (C_3H_8), температура достигает 268 К (температуры облака) примерно на расстоянии 0.015 метра от реагента. Для углекислого газа (CO_2) это расстояние несколько больше и составляет около 0.03 метра.

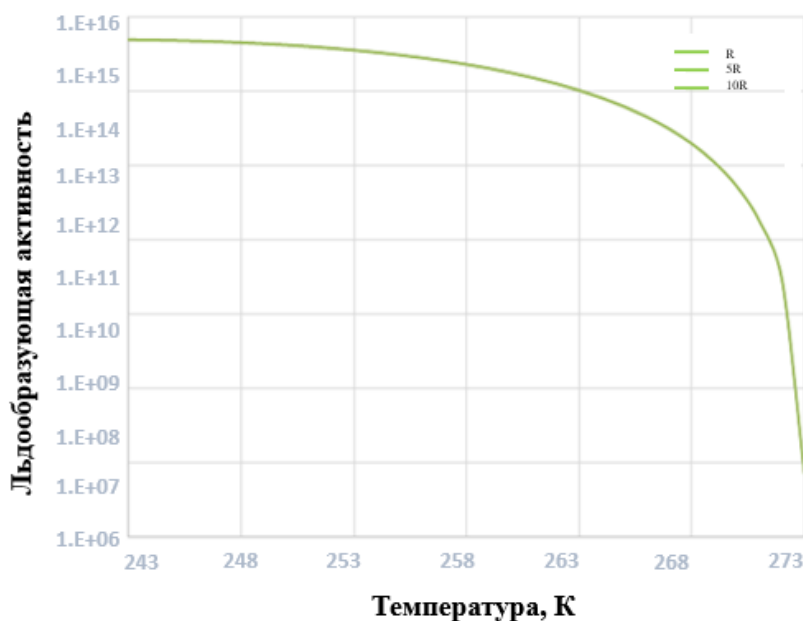


Рисунок 18. График зависимости льдообразующей активности от температуры облака для радиусов R, 5R, 10R для CO_2

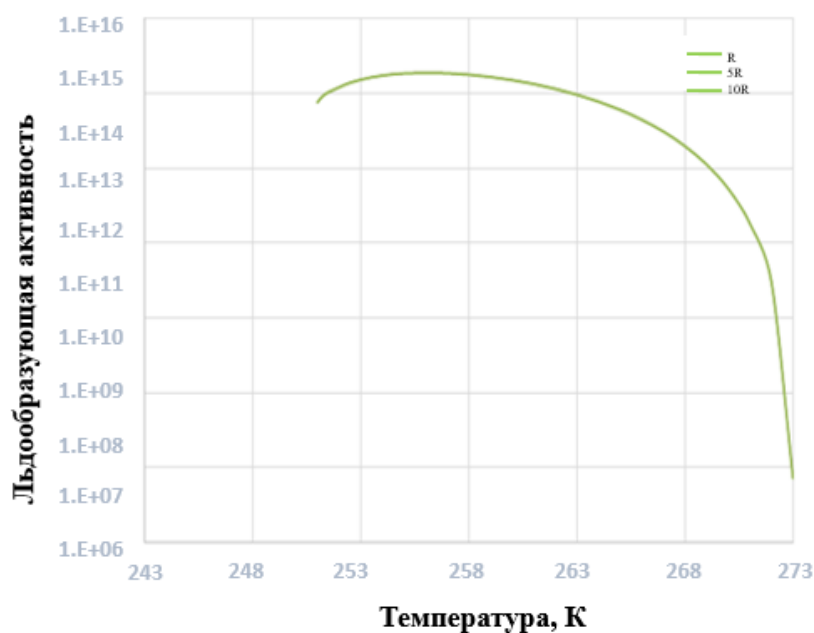


Рисунок 19. График зависимости льдообразующей активности от температуры облака для радиусов R, 5R, 10R для C_3H_8

Для всех радиусов частиц $n_{\Sigma}(T_{обл})$ и $N_{лоар}(T_{обл})$ имеют ярко выраженный максимум в определенном температурном диапазоне.

С увеличением радиуса частиц реагента R максимум значений n_{Σ} и $N_{лоар}$ значительно возрастает. Это связано с тем, что более крупные частицы содержат больше вещества, способного образовать ледяные зародыши.

Положение максимума n_{Σ} и $N_{лоар}$ для всех радиусов наблюдается примерно при температуре 250–255 К. Это указывает на оптимальный температурный диапазон для образования льдообразующих ядер в облаке.

После достижения максимума наблюдается резкое снижение значений n_{Σ} и $N_{лоар}$. Это связано с тем, что при повышении температуры облака ледяные зародыши становятся термодинамически неустойчивыми и разрушаются. Аналогичные зависимости наблюдаются для C_3H_8 , подтверждая общий тренд: чем больше радиус, тем выше льдообразующая активность.

Таким образом, результаты расчетов и построенные графики позволяют сделать вывод о том, что льдообразующая активность частиц реагента существенно возрастает с увеличением их радиуса, а температурный диапазон

для наиболее эффективного льдообразования находится в интервале примерно 250–255 К.

На (рис.20-21) представлены графики изменения времени испарения частицы от пути по результатам расчетов по формуле (7) для реагентов CO_2 , C_3H_8 .

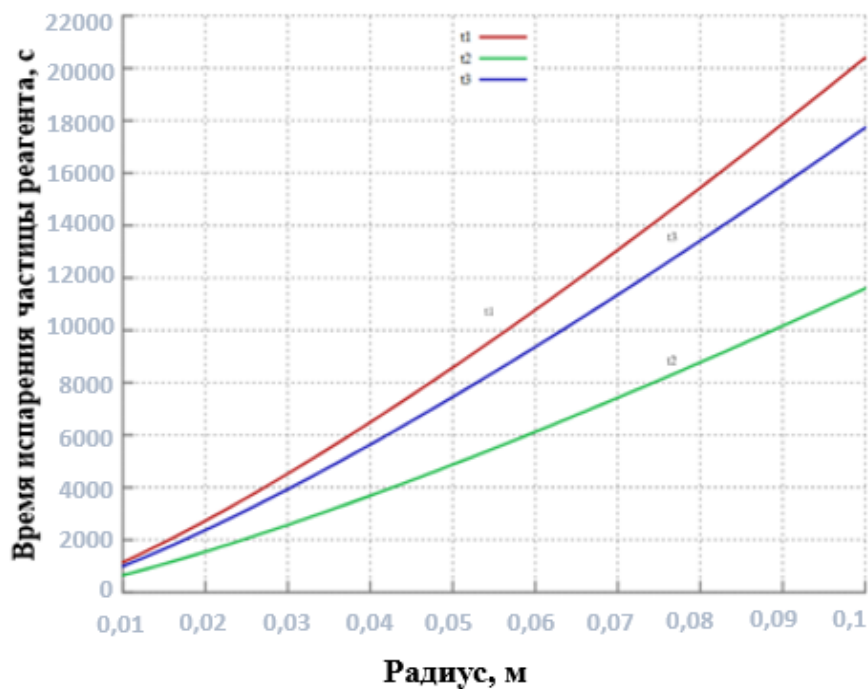


Рисунок 20. График зависимости $\tau_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R до 10R для CO_2

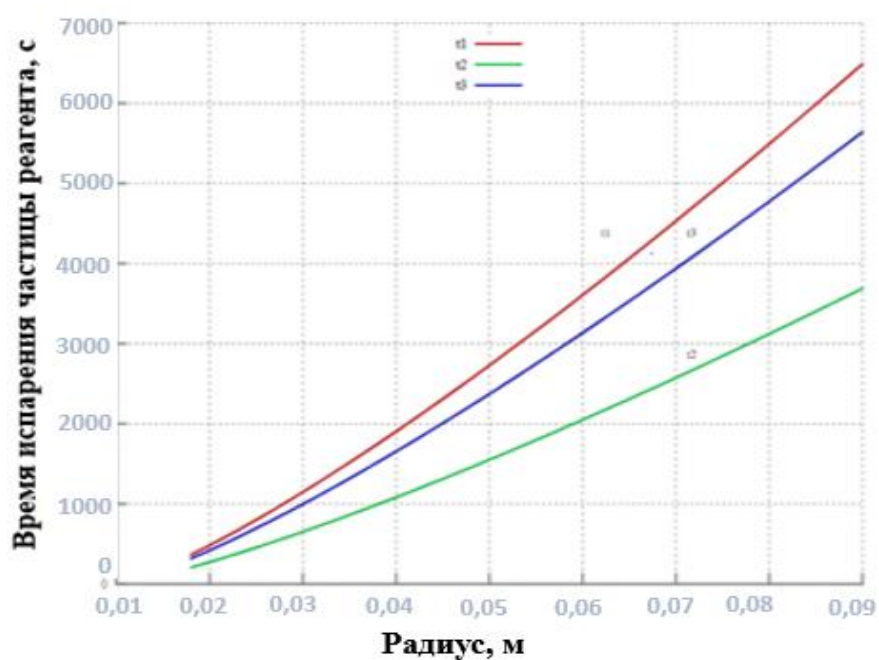


Рисунок 21. График зависимости $\tau_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R до $10R$ для C_3H_8

На (рис.22-23) представлены графики изменения времени пути, который приходит реагент для полного испарения от времени, по результатам расчетов по формуле (8) для реагентов CO_2 , C_3H_8 .

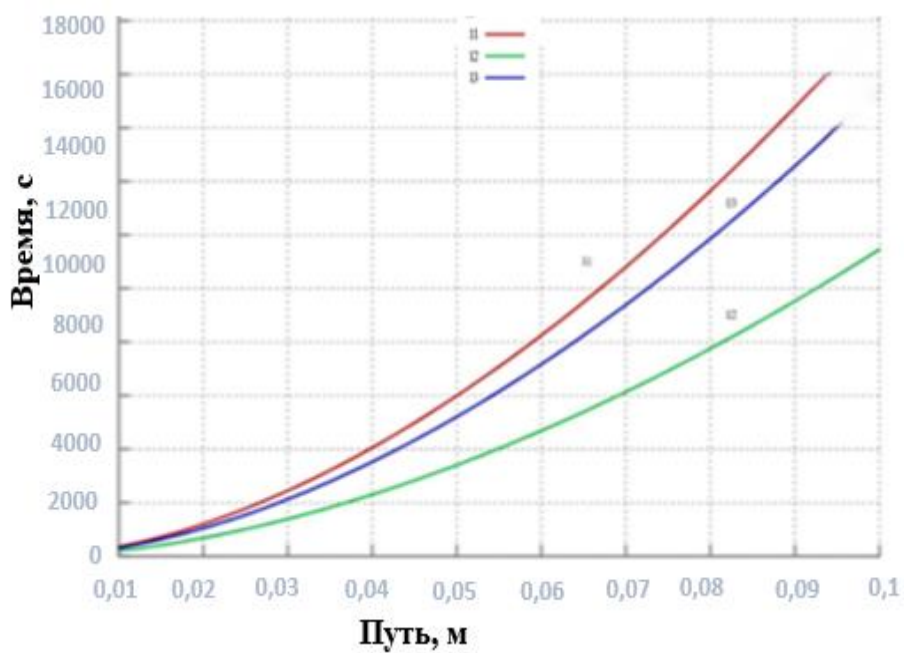


Рисунок 22. График зависимости $t_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R до $10R$ для CO_2

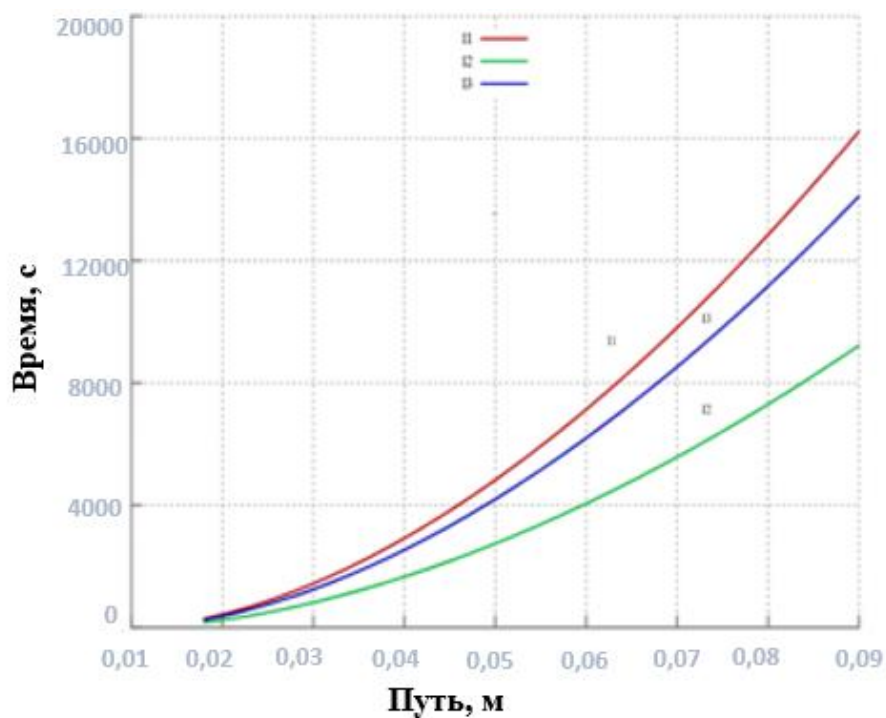


Рисунок 23. График зависимости $l_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R до $10R$ для C_3H_8

Влияние радиуса частицы на время и путь испарения: из графиков видно, что при увеличении радиуса частицы R как время полного испарения $\tau_{\text{исп}}$, так и путь испарения $l_{\text{исп}}$ возрастают. Это соответствует физическому смыслу процесса – для более крупных частиц требуется больше времени и расстояния для полного испарения.

Влияние температуры облака: при сравнении графиков для разных температур заметно, что при повышении температуры облака время полного испарения $\tau_{\text{исп}}$ и путь испарения $l_{\text{исп}}$ уменьшаются. Это связано с ускорением процессов испарения при более высокой температуре, когда кинетическая энергия молекул увеличивается, и испарение происходит быстрее.

Сравнение графиков для $R=0,01$ и $R=0,001$:

Для $R = 0,01$ время и путь испарения заметно больше, чем для меньшего радиуса $R = 0,001$. Это подтверждает общую тенденцию роста времени и пути испарения с увеличением радиуса частицы.

На всех графиках сохраняется одинаковая форма зависимости, характерная для квадратичного роста (линии кривых близки к параболе). Это указывает на согласованность расчетной модели.

Таким образом, проведенные расчеты и построенные графики подтвердили теоретическую зависимость времени полного испарения и пути испарения от радиуса частицы и температуры облака.

На (рис.24-25) представлены графики изменения времени испарения от температуры, с начальным шагом от $5R$ до $10R$, по результатам расчетов по формуле (7) для реагентов CO_2 , C_3H_8 .

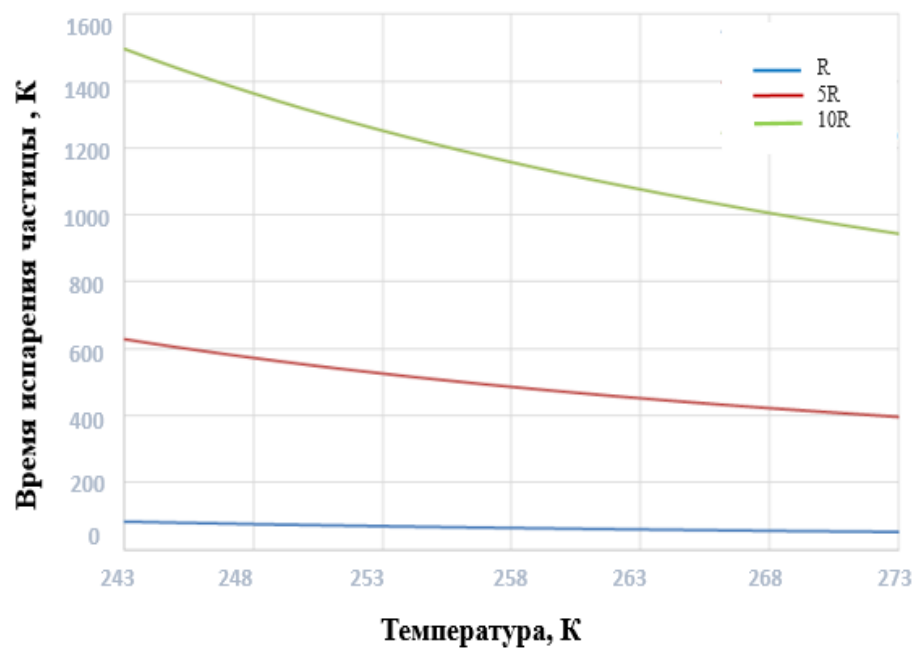


Рисунок 24. График зависимости $\tau_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R, 5R, 10R для CO₂

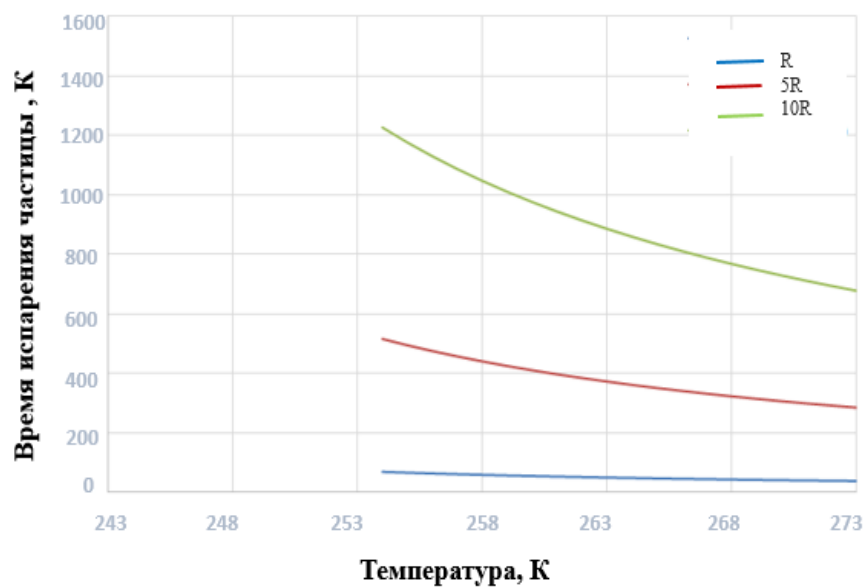


Рисунок 25. График зависимости $\tau_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от R, 5R, 10R для C₃H₈

На (рис.26-27) представлены графики изменения времени пути, который приходит реагент для полного испарения от времени, с начальным шагом от 5R до 10R, по результатам расчетов по формуле (8) для реагентов CO₂, C₃H₈

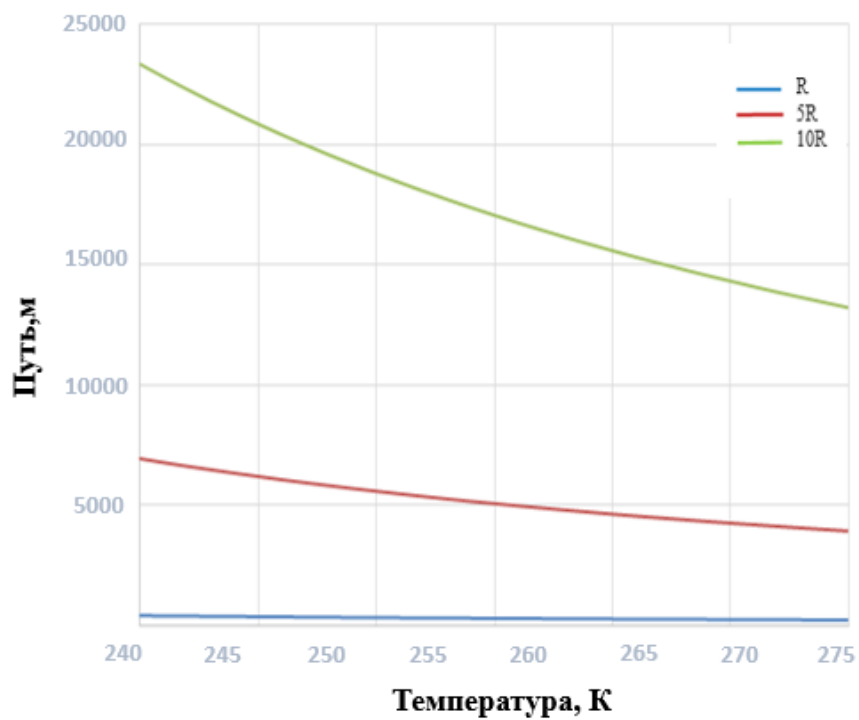


Рисунок 26. График зависимости $I_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от $R, 5R, 10R$ для CO_2

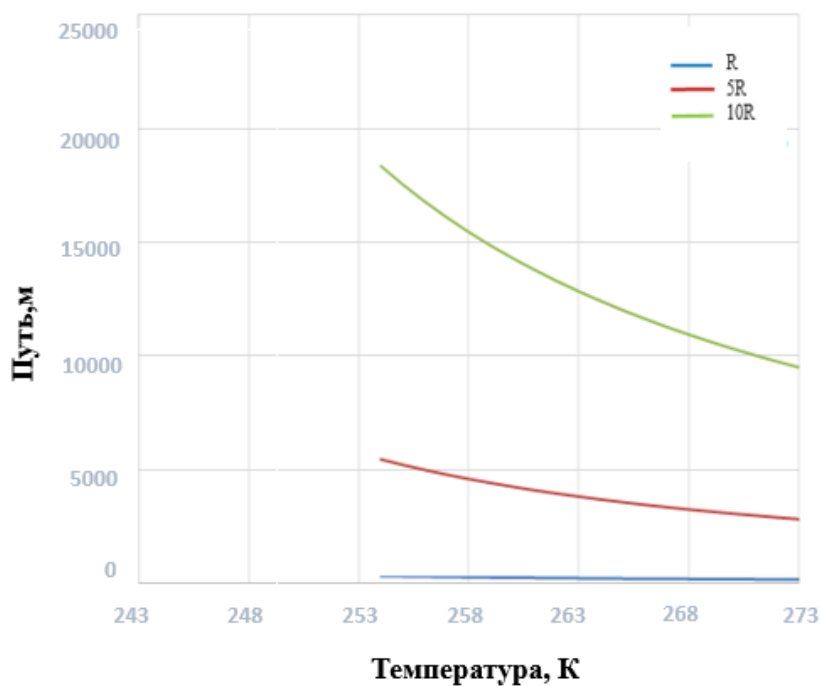


Рисунок 27. График зависимости $I_{\text{исп}}(R)$ для радиусов от $R, 5R, 10R$ для C_3H_8

С увеличением радиуса путь испарения значительно возрастает, поскольку частица большего радиуса требует больше времени для полного испарения, а также перемещается на большее расстояние.

Зависимость пути испарения от температуры и радиуса хорошо согласуется с физическим смыслом процессов: при более высоких температурах скорость испарения выше, а при большем радиусе требуется больше времени для испарения.

Графики $\tau_{\text{исп}}(T)$ для $R = 0,001$:

Наблюдается аналогичная картина уменьшения времени испарения с ростом температуры.

Абсолютные значения времени испарения для $R = 0,001$ ниже, чем для $R = 0,01$, что ожидаемо, так как меньшие частицы испаряются быстрее.

Зависимость остается ступенчатой по радиусам, но все кривые сдвинуты вниз.

Графики $l_{\text{исп}}(T)$ для $R = 0,001$:

Аналогично, путь испарения уменьшается с ростом температуры.

С уменьшением радиуса пути испарения также уменьшаются, так как частица испаряется быстрее.

Все кривые имеют общую тенденцию убывания и сохраняют ступенчатую структуру по радиусам.

Вывод: при увеличении температуры как время полного испарения, так и путь испарения уменьшаются, что связано с ростом скорости испарения при повышении температуры. С увеличением радиуса частиц время и путь испарения увеличиваются из-за большего объема вещества в частицах. Зависимости имеют ярко выраженный нелинейный характер.

В табл.2 представлены исходные данные хладореагентов $\text{CO}_2, \text{C}_3\text{H}_8$.

Таблица 2. Исходные данные

Тобл, К	R, м	Реагент
268	0,001	CO_2
268	0,001	C_3H_8

Расчетные характеристики реагентов (при температуре 268 К и при радиусе частицы реагента 0,001 м) и их сравнение представлены в (таблица 3.).

Таблица 3. Расчетные характеристики реагентов

Сравниваемая характеристика	Реагент	
	CO ₂	C ₃ H ₈
Зона спонтанной конденсации	$\Delta x=0,0022$ м	$\Delta x=0,0006$ м
Число жизнеспособных зародышей	1,28E+11	7,46E+10
Льдообразующая активность	1,98E+16	1,96E+16
Время испарения	56,59 с	42,44 с
Путь испарения	279,59 м	213,57 м

Заключение

В течение нескольких последних десятилетий ученые, посвятившие себя изучению атмосферы, отдали много сил исследованию путей целенаправленного влияния на погоду. Работы, ведущиеся во всем мире в области активного воздействия на погоду, можно подразделить на шесть основных категорий: эксперименты с целью искусственного вызывания дождя и снега, борьба с градом, предотвращение молний, активные воздействия на ураганы, рассеяние туманов и воздействия на явления погоды, вызванные «небрежной» деятельностью человека.

В данной работе произведено исследование процессов, происходящих вокруг частиц реагентов CO_2 и C_3H_8 , внесенных в насыщенный водяным паром воздух при различных параметрах атмосферы.

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы:

- Изучена область спонтанной конденсации, формирующаяся вокруг частиц CO_2 и C_3H_8 , используемых в качестве хладагентов.
- Определена льдообразующая активность CO_2 и C_3H_8 .
- Проанализирована зависимость времени и пути испарения частицы реагента от температуры облака и зависимость времени и пути испарения частицы реагента от ее размера.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

Более крупный радиус частицы значительно увеличивает как время, необходимое для её полного испарения, так и расстояние, которое она пролетит до этого момента. Таким образом, более крупные частицы испаряются значительно медленнее.

При анализе двух реагентов с одинаковым радиусом частиц и температуре облака 268 К, наблюдаются сравнительно небольшие различия в параметрах испарения. Однако, при повышении температуры облака до 273 К, различия в расчетах времени и пути испарения становятся значительно более выраженными, увеличиваясь в несколько раз. Из этого следует, что реагент CO_2 испаряется медленнее и требует большего расстояния для полного испарения, чем C_3H_8 .

Следует также учитывать влияние температуры облака: чем ниже температура облака, тем сильнее она замедляет испарение частицы и увеличивает пройденный ею путь. Это связано с тем, что более низкая температура увеличивает разницу температур между частицей и окружающей средой.

По итогу проведенного анализа можно сделать вывод, что хладореагент CO_2 по сравниваемым параметрам эффективнее для внесения в облака, чем хладореагент C_3H_8 .

Список источников

1. Химическая формула молекулы водорода [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vega-gaming.ru/photo/molekula-vodoroda-formula-ximicheskaya/> (дата обращения 22.01.2025).
2. Семенченко Б. А. Физическая метеорология.- Аспект пресс, 2002.
3. Образование облаков в атмосфере [Электронный ресурс].- Режим доступа: https://studopedia.su/14_122332_mm-mm.html (дата обращения 20.01.2025).
4. Круговорот воды в атмосфере. [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
https://znanio.ru/media/elektronnoe_uchebnoe_posobie_zemlya_planeta-5090
(дата обращения 20.01.2025).
5. Крюкова С. В. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Учебное пособие.- СПб.: Астерион, 2018.- 4 с .
6. Никандров В.Я. Искусственные воздействия на облака и туманы. - :Гидрометеиздат, 1959.
7. Растопчин В.В., Уйбо В.И. и др. Патент RU №2 161 881 «Установка для коррекции погодных условий». 1999.
8. Бондаренко Н.Н., Уйбо В.И. Патент RU № 2 154 371 «Способ изменения погодных условий в пределах заданного пространства». 2000.
9. Бухаров М.В. Способ воздействия на электрическое состояние облаков. Патент Российской Федерации N 2 080 776, МКП А 01 G 15/00 от 1996.
10. Покровский П.Е., Стожков Ю.И. Патент Российской Федерации №2 112 360 «Способ искусственного вызывания осадков»,1998. – 19 с.
11. Плауде Н.О., Соловьев А.Д. Льдообразующие аэрозоли для воздействия на облака. - ВНИГМИ-МЦД, Обзор, Обнинск, 1979. - 82 с.
12. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. -Л., Гидрометеиздат, 1990. - 464 с.

13. Бекряев В. И. Некоторые вопросы физики облаков и активных воздействий на них. СПб., изд. РГГМУ, 2007 - 72с.
14. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков. М., "Мир", 1983, 271 с.
15. РД 52.11.677-2006 Методические указания. Проведение работ по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах.

Таблица 1. Расчетные данные для CO₂

X, м	T, K	$f_{\text{в}}$	$f_{\text{в,кр}}$
0.0010	194.00	3505.21	21.63
0.0011	200.73	1243.24	17.75
0.0012	206.33	556.99	15.25
0.0013	211.08	293.61	13.52
0.0014	215.14	174.11	12.27
0.0015	218.67	112.75	11.32
0.0016	221.75	78.11	10.58
0.0017	224.47	57.06	9.98
0.0018	226.89	43.47	9.50
0.0019	229.05	34.28	9.10
0.0020	231.00	27.80	8.76
0.0021	232.76	23.08	8.47
0.0022	234.36	19.55	8.22
0.0023	235.83	16.83	8.00
0.0024	237.17	14.70	7.81
0.0025	238.40	13.00	7.64
0.0026	239.54	11.62	7.49
0.0027	240.59	10.49	7.35
0.0028	241.57	9.54	7.23
0.0029	242.48	8.75	7.12
0.0030	243.33	8.07	7.01
0.0031	244.13	7.49	6.92
0.0032	244.88	6.98	6.84
0.0033	245.58	6.54	6.76
0.0034	246.24	6.16	6.69
0.0035	246.86	5.81	6.62
0.0036	247.44	5.51	6.56
0.0037	248.00	5.24	6.50
0.0038	248.53	5.00	6.44
0.0039	249.03	4.78	6.39
0.0040	249.50	4.58	6.35
0.0041	249.95	4.40	6.30
0.0042	250.38	4.23	6.26
0.0043	250.79	4.08	6.22
0.0044	251.18	3.95	6.18
0.0045	251.56	3.82	6.15

0.0046	251.91	3.70	6.11
0.0047	252.26	3.59	6.08
0.0048	252.58	3.49	6.05
0.0049	252.90	3.40	6.02
0.0050	253.20	3.31	5.99
0.0051	253.49	3.23	5.97
0.0052	253.77	3.15	5.94
0.0053	254.04	3.08	5.92
0.0054	254.30	3.01	5.90
0.0055	254.55	2.95	5.88
0.0056	254.79	2.89	5.85
0.0057	255.02	2.83	5.83
0.0058	255.24	2.78	5.82
0.0059	255.46	2.73	5.80
0.0060	255.67	2.68	5.78
0.0061	255.87	2.64	5.76
0.0062	256.06	2.59	5.75
0.0063	256.25	2.55	5.73
0.0064	256.44	2.51	5.71
0.0065	256.62	2.48	5.70
0.0066	256.79	2.44	5.68
0.0067	256.96	2.41	5.67
0.0068	257.12	2.37	5.66
0.0069	257.28	2.34	5.65
0.0070	257.43	2.31	5.63

Таблица 2. Расчетные данные для C_3H_8

$X, м$	T, K	f_{ν}	$f_{\nu, кр}$
0.0040	194.00	2379.66	21.63
0.0044	200.27	902.91	17.98
0.0048	205.50	424.68	15.59
0.0052	209.92	232.19	13.91
0.0056	213.71	141.65	12.69
0.0060	217.00	93.82	11.75
0.0064	219.88	66.20	11.02
0.0068	222.41	49.09	10.43
0.0072	224.67	37.88	9.94
0.0076	226.68	30.19	9.54
0.0080	228.50	24.72	9.20
0.0084	230.14	20.69	8.91
0.0088	231.64	17.64	8.65

0.0092	233.00	15.28	8.43
0.0096	234.25	13.43	8.24
0.0100	235.40	11.93	8.06
0.0104	236.46	10.71	7.91
0.0108	237.44	9.71	7.77
0.0112	238.36	8.86	7.64
0.0116	239.21	8.15	7.53
0.0120	240.00	7.54	7.43
0.0124	240.74	7.02	7.33
0.0128	241.44	6.56	7.24
0.0132	242.09	6.16	7.16
0.0136	242.71	5.81	7.09
0.0140	243.29	5.50	7.02
0.0144	243.83	5.22	6.96
0.0148	244.35	4.98	6.90
0.0152	244.84	4.75	6.84
0.0156	245.31	4.55	6.79
0.0160	245.75	4.37	6.74
0.0164	246.17	4.20	6.69
0.0168	246.57	4.05	6.65
0.0172	246.95	3.91	6.61
0.0176	247.32	3.78	6.57
0.0180	247.67	3.67	6.53
0.0184	248.00	3.56	6.50
0.0188	248.32	3.46	6.47
0.0192	248.63	3.36	6.43
0.0196	248.92	3.28	6.40
0.0200	249.20	3.19	6.38
0.0204	249.47	3.12	6.35
0.0208	249.73	3.05	6.32
0.0212	249.98	2.98	6.30
0.0216	250.22	2.92	6.27
0.0220	250.45	2.86	6.25
0.0224	250.68	2.80	6.23
0.0228	250.89	2.75	6.21
0.0232	251.10	2.70	6.19
0.0236	251.31	2.65	6.17
0.0240	251.50	2.61	6.15
0.0244	251.69	2.56	6.13
0.0248	251.87	2.52	6.12
0.0252	252.05	2.48	6.10
0.0256	252.22	2.45	6.08
0.0260	252.38	2.41	6.07

0.0264	252.55	2.38	6.05
0.0268	252.70	2.35	6.04
0.0272	252.85	2.32	6.03
0.0276	253.00	2.29	6.01
0.0280	253.14	2.26	6.00
0.0284	253.28	2.23	5.99
0.0288	253.42	2.21	5.98
0.0292	253.55	2.18	5.96
0.0296	253.68	2.16	5.95
0.0300	253.80	2.13	5.94
0.0304	253.92	2.11	5.93
0.0308	254.04	2.09	5.92
0.0312	254.15	2.07	5.91
0.0316	254.27	2.05	5.90
0.0320	254.38	2.03	5.89
0.0324	254.48	2.01	5.88
0.0328	254.59	2.00	5.87
0.0332	254.69	1.98	5.86
0.0336	254.79	1.96	5.85
0.0340	254.88	1.95	5.85
0.0344	254.98	1.93	5.84
0.0348	255.07	1.92	5.83
0.0352	255.16	1.90	5.82
0.0356	255.25	1.89	5.81
0.0360	255.33	1.87	5.81
0.0364	255.42	1.86	5.80
0.0368	255.50	1.85	5.79
0.0372	255.58	1.83	5.79
0.0376	255.66	1.82	5.78
0.0380	255.74	1.81	5.77
0.0384	255.81	1.80	5.77
0.0388	255.89	1.79	5.76
0.0392	255.96	1.78	5.75
0.0396	256.03	1.77	5.75
0.0400	256.10	1.76	5.74

Таблица 3. Расчетные данные для CO₂

T	R = 0,01		5R = 0,05		10R = 0,1	
	N Σ (Тобл)	Nлоар(Тобл)	N Σ (Тобл)	Nлоар(Тобл)	N Σ (Тобл)	Nлоар(Тобл)
243	1,82E+04	2,79E+06	2,28E+06	2,79E+06	1,82E+07	2,79E+06
244	1,87E+04	2,86E+06	2,33E+06	2,86E+06	1,87E+07	2,86E+06
245	1,90E+04	2,91E+06	2,38E+06	2,91E+06	1,90E+07	2,91E+06
246	1,94E+04	2,96E+06	2,42E+06	2,96E+06	1,94E+07	2,96E+06
247	1,96E+04	3,00E+06	2,45E+06	3,00E+06	1,96E+07	3,00E+06
248	1,98E+04	3,02E+06	2,47E+06	3,02E+06	1,98E+07	3,02E+06
249	1,98E+04	3,04E+06	2,48E+06	3,04E+06	1,98E+07	3,04E+06
250	1,98E+04	3,04E+06	2,48E+06	3,04E+06	1,98E+07	3,04E+06
251	1,98E+04	3,02E+06	2,47E+06	3,02E+06	1,98E+07	3,02E+06
252	1,96E+04	2,99E+06	2,44E+06	2,99E+06	1,96E+07	2,99E+06
253	1,93E+04	2,95E+06	2,41E+06	2,95E+06	1,93E+07	2,95E+06
254	1,89E+04	2,89E+06	2,36E+06	2,89E+06	1,89E+07	2,89E+06
255	1,84E+04	2,81E+06	2,30E+06	2,81E+06	1,84E+07	2,81E+06
256	1,78E+04	2,72E+06	2,22E+06	2,72E+06	1,78E+07	2,72E+06
257	1,70E+04	2,61E+06	2,13E+06	2,61E+06	1,70E+07	2,61E+06
258	1,62E+04	2,48E+06	2,03E+06	2,48E+06	1,62E+07	2,48E+06
259	1,53E+04	2,34E+06	1,91E+06	2,34E+06	1,53E+07	2,34E+06
260	1,42E+04	2,18E+06	1,78E+06	2,18E+06	1,42E+07	2,18E+06
261	1,31E+04	2,01E+06	1,64E+06	2,01E+06	1,31E+07	2,01E+06
262	1,19E+04	1,82E+06	1,49E+06	1,82E+06	1,19E+07	1,82E+06
263	1,06E+04	1,63E+06	1,33E+06	1,63E+06	1,06E+07	1,63E+06
264	9,29E+03	1,42E+06	1,16E+06	1,42E+06	9,29E+06	1,42E+06
265	7,93E+03	1,21E+06	9,92E+05	1,21E+06	7,93E+06	1,21E+06
266	6,56E+03	1,00E+06	8,21E+05	1,00E+06	6,56E+06	1,00E+06
267	5,22E+03	7,99E+05	6,52E+05	7,99E+05	5,22E+06	7,99E+05
268	3,93E+03	6,01E+05	4,91E+05	6,01E+05	3,93E+06	6,01E+05
269	2,74E+03	4,19E+05	3,42E+05	4,19E+05	2,74E+06	4,19E+05
270	1,69E+03	2,59E+05	2,12E+05	2,59E+05	1,69E+06	2,59E+05
271	8,45E+02	1,29E+05	1,06E+05	1,29E+05	8,45E+05	1,29E+05
272	2,59E+02	3,97E+04	3,24E+04	3,97E+04	2,59E+05	3,97E+04
273	01,04,7201	7,22E+02	5,90E+02	7,22E+02	4,72E+03	7,22E+02

Таблица 4. Расчетные данные для C_3H_8

T	R = 0,004		5R = 0,02		10R = 0,04	
	$N\Sigma(\text{Тобл})$	$N\text{ЛОАР}(\text{Тобл})$	$N\Sigma(\text{Тобл})$	$N\text{ЛОАР}(\text{Тобл})$	$N\Sigma(\text{Тобл})$	$N\text{ЛОАР}(\text{Тобл})$
243	1,17E+03	2,79E+06	1,46E+05	2,79E+06	1,17E+06	2,79E+06
244	1,19E+03	2,86E+06	1,49E+05	2,86E+06	1,19E+06	2,86E+06
245	1,22E+03	2,91E+06	1,52E+05	2,91E+06	1,22E+06	2,91E+06
246	1,24E+03	2,96E+06	1,55E+05	2,96E+06	1,24E+06	2,96E+06
247	1,25E+03	3,00E+06	1,57E+05	3,00E+06	1,25E+06	3,00E+06
248	1,26E+03	3,02E+06	1,58E+05	3,02E+06	1,26E+06	3,02E+06
249	1,27E+03	3,04E+06	1,59E+05	3,04E+06	1,27E+06	3,04E+06
250	1,27E+03	3,04E+06	1,59E+05	3,04E+06	1,27E+06	3,04E+06
251	1,26E+03	3,02E+06	1,58E+05	3,02E+06	1,26E+06	3,02E+06
252	1,25E+03	2,99E+06	1,56E+05	2,99E+06	1,25E+06	2,99E+06
253	1,23E+03	2,95E+06	1,54E+05	2,95E+06	1,23E+06	2,95E+06
254	1,21E+03	2,89E+06	1,51E+05	2,89E+06	1,21E+06	2,89E+06
255	1,18E+03	2,81E+06	1,47E+05	2,81E+06	1,18E+06	2,81E+06
256	1,14E+03	2,72E+06	1,42E+05	2,72E+06	1,14E+06	2,72E+06
257	1,09E+03	2,61E+06	1,36E+05	2,61E+06	1,09E+06	2,61E+06
258	1,04E+03	2,48E+06	1,30E+05	2,48E+06	1,04E+06	2,48E+06
259	9,77E+02	2,34E+06	1,22E+05	2,34E+06	9,77E+05	2,34E+06
260	9,11E+02	2,18E+06	1,14E+05	2,18E+06	9,11E+05	2,18E+06
261	8,39E+02	2,01E+06	1,05E+05	2,01E+06	8,39E+05	2,01E+06
262	7,62E+02	1,82E+06	9,52E+04	1,82E+06	7,62E+05	1,82E+06
263	6,80E+02	1,63E+06	8,50E+04	1,63E+06	6,80E+05	1,63E+06
264	5,95E+02	1,42E+06	7,43E+04	1,42E+06	5,95E+05	1,42E+06
265	5,08E+02	1,21E+06	6,35E+04	1,21E+06	5,08E+05	1,21E+06
266	4,20E+02	1,00E+06	5,25E+04	1,00E+06	4,20E+05	1,00E+06
267	3,34E+02	7,99E+05	4,17E+04	7,99E+05	3,34E+05	7,99E+05
268	2,52E+02	6,01E+05	3,14E+04	6,01E+05	2,52E+05	6,01E+05
269	1,75E+02	4,19E+05	2,19E+04	4,19E+05	1,75E+05	4,19E+05
270	1,08E+02	2,59E+05	1,35E+04	2,59E+05	1,08E+05	2,59E+05
271	5,41E+01	1,29E+05	6,76E+03	1,29E+05	5,41E+04	1,29E+05
272	1,66E+01	3,97E+04	2,07E+03	3,97E+04	1,66E+04	3,97E+04
273	3,02E-01	7,22E+02	3,78E+01	7,22E+02	3,02E+02	7,22E+02

Таблица 5. Расчетные данные для CO₂

R = 0,01						
R	t1	t2	t3	I1	I2	I3
0,01	1,15E+03	6,52E+02	9,97E+02	1,79E+04	1,02E+04	1,56E+04
0,011	1,29E+03	7,35E+02	1,12E+03	2,12E+04	1,20E+04	1,84E+04
0,012	1,44E+03	8,19E+02	1,25E+03	2,47E+04	1,40E+04	2,14E+04
0,013	1,59E+03	9,05E+02	1,38E+03	2,84E+04	1,61E+04	2,47E+04
0,014	1,75E+03	9,93E+02	1,52E+03	3,23E+04	1,84E+04	2,81E+04
0,015	1,90E+03	1,08E+03	1,66E+03	3,65E+04	2,07E+04	3,17E+04
0,016	2,06E+03	1,17E+03	1,79E+03	4,08E+04	2,32E+04	3,55E+04
0,017	2,23E+03	1,27E+03	1,94E+03	4,54E+04	2,58E+04	3,94E+04
0,018	2,39E+03	1,36E+03	2,08E+03	5,02E+04	2,85E+04	4,36E+04
0,019	2,56E+03	1,45E+03	2,22E+03	5,51E+04	3,13E+04	4,79E+04
0,02	2,73E+03	1,55E+03	2,37E+03	6,03E+04	3,43E+04	5,24E+04
0,021	2,90E+03	1,65E+03	2,52E+03	6,57E+04	3,73E+04	5,71E+04
0,022	3,07E+03	1,75E+03	2,67E+03	7,13E+04	4,05E+04	6,19E+04
0,023	3,25E+03	1,85E+03	2,82E+03	7,70E+04	4,38E+04	6,69E+04
0,024	3,43E+03	1,95E+03	2,98E+03	8,30E+04	4,72E+04	7,21E+04
0,025	3,61E+03	2,05E+03	3,14E+03	8,91E+04	5,07E+04	7,75E+04
0,026	3,79E+03	2,15E+03	3,29E+03	9,54E+04	5,42E+04	8,30E+04
0,027	3,97E+03	2,26E+03	3,45E+03	1,02E+05	5,80E+04	8,86E+04
0,028	4,16E+03	2,36E+03	3,61E+03	1,09E+05	6,18E+04	9,44E+04
0,029	4,34E+03	2,47E+03	3,77E+03	1,16E+05	6,57E+04	1,00E+05
0,03	4,53E+03	2,57E+03	3,94E+03	1,23E+05	6,97E+04	1,07E+05
0,031	4,72E+03	2,68E+03	4,10E+03	1,30E+05	7,38E+04	1,13E+05
0,032	4,91E+03	2,79E+03	4,27E+03	1,37E+05	7,80E+04	1,19E+05
0,033	5,10E+03	2,90E+03	4,44E+03	1,45E+05	8,23E+04	1,26E+05
0,034	5,30E+03	3,01E+03	4,60E+03	1,53E+05	8,68E+04	1,33E+05
0,035	5,49E+03	3,12E+03	4,77E+03	1,61E+05	9,13E+04	1,40E+05
0,036	5,69E+03	3,23E+03	4,95E+03	1,69E+05	9,59E+04	1,47E+05
0,037	5,89E+03	3,35E+03	5,12E+03	1,77E+05	1,01E+05	1,54E+05
0,038	6,09E+03	3,46E+03	5,29E+03	1,85E+05	1,05E+05	1,61E+05
0,039	6,29E+03	3,57E+03	5,47E+03	1,94E+05	1,10E+05	1,69E+05
0,04	6,49E+03	3,69E+03	5,64E+03	2,03E+05	1,15E+05	1,76E+05
0,041	6,69E+03	3,80E+03	5,82E+03	2,12E+05	1,20E+05	1,84E+05
0,042	6,90E+03	3,92E+03	6,00E+03	2,21E+05	1,26E+05	1,92E+05
0,043	7,11E+03	4,04E+03	6,18E+03	2,30E+05	1,31E+05	2,00E+05
0,044	7,31E+03	4,16E+03	6,36E+03	2,40E+05	1,36E+05	2,08E+05
0,045	7,52E+03	4,27E+03	6,54E+03	2,49E+05	1,42E+05	2,17E+05
0,046	7,73E+03	4,39E+03	6,72E+03	2,59E+05	1,47E+05	2,25E+05
0,047	7,94E+03	4,51E+03	6,90E+03	2,69E+05	1,53E+05	2,34E+05
0,048	8,15E+03	4,63E+03	7,09E+03	2,79E+05	1,59E+05	2,43E+05
0,049	8,37E+03	4,75E+03	7,27E+03	2,89E+05	1,64E+05	2,51E+05
0,05	8,58E+03	4,88E+03	7,46E+03	3,00E+05	1,70E+05	2,61E+05

0,051	8,79E+03	5,00E+03	7,64E+03	3,10E+05	1,76E+05	2,70E+05
0,052	9,01E+03	5,12E+03	7,83E+03	3,21E+05	1,82E+05	2,79E+05
0,053	9,23E+03	5,24E+03	8,02E+03	3,32E+05	1,89E+05	2,88E+05
0,054	9,45E+03	5,37E+03	8,21E+03	3,43E+05	1,95E+05	2,98E+05
0,055	9,67E+03	5,49E+03	8,40E+03	3,54E+05	2,01E+05	3,08E+05
0,056	9,89E+03	5,62E+03	8,59E+03	3,66E+05	2,08E+05	3,18E+05
0,057	1,01E+04	5,74E+03	8,78E+03	3,77E+05	2,14E+05	3,28E+05
0,058	1,03E+04	5,87E+03	8,98E+03	3,89E+05	2,21E+05	3,38E+05
0,059	1,06E+04	6,00E+03	9,17E+03	4,00E+05	2,28E+05	3,48E+05
0,06	1,08E+04	6,12E+03	9,37E+03	4,12E+05	2,34E+05	3,58E+05
0,061	1,10E+04	6,25E+03	9,56E+03	4,25E+05	2,41E+05	3,69E+05
0,062	1,12E+04	6,38E+03	9,76E+03	4,37E+05	2,48E+05	3,80E+05
0,063	1,15E+04	6,51E+03	9,95E+03	4,49E+05	2,55E+05	3,90E+05
0,064	1,17E+04	6,64E+03	1,02E+04	4,62E+05	2,62E+05	4,01E+05
0,065	1,19E+04	6,77E+03	1,04E+04	4,74E+05	2,70E+05	4,12E+05
0,066	1,21E+04	6,90E+03	1,06E+04	4,87E+05	2,77E+05	4,24E+05
0,067	1,24E+04	7,03E+03	1,08E+04	5,00E+05	2,84E+05	4,35E+05
0,068	1,26E+04	7,16E+03	1,10E+04	5,13E+05	2,92E+05	4,46E+05
0,069	1,28E+04	7,29E+03	1,12E+04	5,27E+05	2,99E+05	4,58E+05
0,07	1,31E+04	7,43E+03	1,14E+04	5,40E+05	3,07E+05	4,69E+05
0,071	1,33E+04	7,56E+03	1,16E+04	5,54E+05	3,15E+05	4,81E+05
0,072	1,35E+04	7,69E+03	1,18E+04	5,67E+05	3,22E+05	4,93E+05
0,073	1,38E+04	7,83E+03	1,20E+04	5,81E+05	3,30E+05	5,05E+05
0,074	1,40E+04	7,96E+03	1,22E+04	5,95E+05	3,38E+05	5,17E+05
0,075	1,42E+04	8,09E+03	1,24E+04	6,09E+05	3,46E+05	5,30E+05
0,076	1,45E+04	8,23E+03	1,26E+04	6,24E+05	3,54E+05	5,42E+05
0,077	1,47E+04	8,37E+03	1,28E+04	6,38E+05	3,63E+05	5,55E+05
0,078	1,50E+04	8,50E+03	1,30E+04	6,53E+05	3,71E+05	5,67E+05
0,079	1,52E+04	8,64E+03	1,32E+04	6,67E+05	3,79E+05	5,80E+05
0,08	1,54E+04	8,77E+03	1,34E+04	6,82E+05	3,88E+05	5,93E+05
0,081	1,57E+04	8,91E+03	1,36E+04	6,97E+05	3,96E+05	6,06E+05
0,082	1,59E+04	9,05E+03	1,38E+04	7,12E+05	4,05E+05	6,19E+05
0,083	1,62E+04	9,19E+03	1,41E+04	7,28E+05	4,14E+05	6,32E+05
0,084	1,64E+04	9,33E+03	1,43E+04	7,43E+05	4,22E+05	6,46E+05
0,085	1,67E+04	9,47E+03	1,45E+04	7,59E+05	4,31E+05	6,59E+05
0,086	1,69E+04	9,60E+03	1,47E+04	7,74E+05	4,40E+05	6,73E+05
0,087	1,71E+04	9,74E+03	1,49E+04	7,90E+05	4,49E+05	6,87E+05
0,088	1,74E+04	9,88E+03	1,51E+04	8,06E+05	4,58E+05	7,01E+05
0,089	1,76E+04	1,00E+04	1,53E+04	8,22E+05	4,67E+05	7,15E+05
0,09	1,79E+04	1,02E+04	1,55E+04	8,38E+05	4,77E+05	7,29E+05
0,091	1,81E+04	1,03E+04	1,58E+04	8,55E+05	4,86E+05	7,43E+05
0,092	1,84E+04	1,04E+04	1,60E+04	8,71E+05	4,95E+05	7,57E+05
0,093	1,86E+04	1,06E+04	1,62E+04	8,88E+05	5,05E+05	7,72E+05
0,094	1,89E+04	1,07E+04	1,64E+04	9,05E+05	5,14E+05	7,86E+05
0,095	1,91E+04	1,09E+04	1,66E+04	9,22E+05	5,24E+05	8,01E+05
0,096	1,94E+04	1,10E+04	1,69E+04	9,39E+05	5,34E+05	8,16E+05
0,097	1,96E+04	1,12E+04	1,71E+04	9,56E+05	5,43E+05	8,31E+05
0,098	1,99E+04	1,13E+04	1,73E+04	9,73E+05	5,53E+05	8,46E+05
0,099	2,02E+04	1,15E+04	1,75E+04	9,91E+05	5,63E+05	8,61E+05
0,1	2,04E+04	1,16E+04	1,77E+04	1,01E+06	5,73E+05	8,76E+05

Таблица 6. Расчетные данные для C_3H_8

R = 0,004						
R	t1	t2	t3	I1	I2	I3
0,004	3,65E+02	2,07E+02	3,17E+02	3,61E+03	2,05E+03	3,14E+03
0,0044	4,11E+02	2,34E+02	3,57E+02	4,26E+03	2,42E+03	3,70E+03
0,0048	4,58E+02	2,61E+02	3,98E+02	4,96E+03	2,82E+03	4,31E+03
0,0052	5,07E+02	2,88E+02	4,40E+02	5,71E+03	3,24E+03	4,96E+03
0,0056	5,56E+02	3,16E+02	4,83E+02	6,50E+03	3,69E+03	5,65E+03
0,006	6,06E+02	3,44E+02	5,27E+02	7,33E+03	4,17E+03	6,37E+03
0,0064	6,57E+02	3,73E+02	5,71E+02	8,21E+03	4,67E+03	7,14E+03
0,0068	7,09E+02	4,03E+02	6,16E+02	9,13E+03	5,19E+03	7,94E+03
0,0072	7,61E+02	4,33E+02	6,61E+02	1,01E+04	5,73E+03	8,77E+03
0,0076	8,14E+02	4,63E+02	7,08E+02	1,11E+04	6,30E+03	9,64E+03
0,008	8,68E+02	4,93E+02	7,55E+02	1,21E+04	6,90E+03	1,05E+04
0,0084	9,23E+02	5,24E+02	8,02E+02	1,32E+04	7,51E+03	1,15E+04
0,0088	9,78E+02	5,56E+02	8,50E+02	1,43E+04	8,15E+03	1,25E+04
0,0092	1,03E+03	5,88E+02	8,99E+02	1,55E+04	8,81E+03	1,35E+04
0,0096	1,09E+03	6,20E+02	9,48E+02	1,67E+04	9,49E+03	1,45E+04
0,01	1,15E+03	6,52E+02	9,97E+02	1,79E+04	1,02E+04	1,56E+04
0,0104	1,21E+03	6,85E+02	1,05E+03	1,92E+04	1,09E+04	1,67E+04
0,0108	1,26E+03	7,18E+02	1,10E+03	2,05E+04	1,17E+04	1,78E+04
0,0112	1,32E+03	7,51E+02	1,15E+03	2,19E+04	1,24E+04	1,90E+04
0,0116	1,38E+03	7,85E+02	1,20E+03	2,32E+04	1,32E+04	2,02E+04
0,012	1,44E+03	8,19E+02	1,25E+03	2,47E+04	1,40E+04	2,14E+04
0,0124	1,50E+03	8,53E+02	1,31E+03	2,61E+04	1,48E+04	2,27E+04
0,0128	1,56E+03	8,88E+02	1,36E+03	2,76E+04	1,57E+04	2,40E+04
0,0132	1,62E+03	9,23E+02	1,41E+03	2,91E+04	1,66E+04	2,53E+04
0,0136	1,69E+03	9,58E+02	1,46E+03	3,07E+04	1,75E+04	2,67E+04
0,014	1,75E+03	9,93E+02	1,52E+03	3,23E+04	1,84E+04	2,81E+04
0,0144	1,81E+03	1,03E+03	1,57E+03	3,39E+04	1,93E+04	2,95E+04
0,0148	1,87E+03	1,06E+03	1,63E+03	3,56E+04	2,02E+04	3,09E+04
0,0152	1,94E+03	1,10E+03	1,68E+03	3,73E+04	2,12E+04	3,24E+04
0,0156	2,00E+03	1,14E+03	1,74E+03	3,90E+04	2,22E+04	3,39E+04
0,016	2,06E+03	1,17E+03	1,79E+03	4,08E+04	2,32E+04	3,55E+04
0,0164	2,13E+03	1,21E+03	1,85E+03	4,26E+04	2,42E+04	3,70E+04
0,0168	2,19E+03	1,25E+03	1,91E+03	4,44E+04	2,53E+04	3,86E+04
0,0172	2,26E+03	1,28E+03	1,96E+03	4,63E+04	2,63E+04	4,03E+04
0,0176	2,33E+03	1,32E+03	2,02E+03	4,82E+04	2,74E+04	4,19E+04
0,018	2,39E+03	1,36E+03	2,08E+03	5,02E+04	2,85E+04	4,36E+04
0,0184	2,46E+03	1,40E+03	2,14E+03	5,21E+04	2,96E+04	4,53E+04
0,0188	2,53E+03	1,44E+03	2,20E+03	5,41E+04	3,08E+04	4,70E+04
0,0192	2,59E+03	1,47E+03	2,25E+03	5,61E+04	3,19E+04	4,88E+04
0,0196	2,66E+03	1,51E+03	2,31E+03	5,82E+04	3,31E+04	5,06E+04
0,02	2,73E+03	1,55E+03	2,37E+03	6,03E+04	3,43E+04	5,24E+04
0,0204	2,80E+03	1,59E+03	2,43E+03	6,24E+04	3,55E+04	5,43E+04
0,0208	2,87E+03	1,63E+03	2,49E+03	6,46E+04	3,67E+04	5,61E+04

0,0212	2,94E+03	1,67E+03	2,55E+03	6,68E+04	3,80E+04	5,80E+04
0,0216	3,00E+03	1,71E+03	2,61E+03	6,90E+04	3,92E+04	6,00E+04
0,022	3,07E+03	1,75E+03	2,67E+03	7,13E+04	4,05E+04	6,19E+04
0,0224	3,14E+03	1,79E+03	2,73E+03	7,35E+04	4,18E+04	6,39E+04
0,0228	3,21E+03	1,83E+03	2,79E+03	7,59E+04	4,31E+04	6,59E+04
0,0232	3,29E+03	1,87E+03	2,86E+03	7,82E+04	4,44E+04	6,80E+04
0,0236	3,36E+03	1,91E+03	2,92E+03	8,06E+04	4,58E+04	7,00E+04
0,024	3,43E+03	1,95E+03	2,98E+03	8,30E+04	4,72E+04	7,21E+04
0,0244	3,50E+03	1,99E+03	3,04E+03	8,54E+04	4,85E+04	7,42E+04
0,0248	3,57E+03	2,03E+03	3,10E+03	8,79E+04	4,99E+04	7,64E+04
0,0252	3,64E+03	2,07E+03	3,17E+03	9,04E+04	5,14E+04	7,85E+04
0,0256	3,72E+03	2,11E+03	3,23E+03	9,29E+04	5,28E+04	8,07E+04
0,026	3,79E+03	2,15E+03	3,29E+03	9,54E+04	5,42E+04	8,30E+04
0,0264	3,86E+03	2,19E+03	3,36E+03	9,80E+04	5,57E+04	8,52E+04
0,0268	3,93E+03	2,24E+03	3,42E+03	1,01E+05	5,72E+04	8,75E+04
0,0272	4,01E+03	2,28E+03	3,48E+03	1,03E+05	5,87E+04	8,98E+04
0,0276	4,08E+03	2,32E+03	3,55E+03	1,06E+05	6,02E+04	9,21E+04
0,028	4,16E+03	2,36E+03	3,61E+03	1,09E+05	6,18E+04	9,44E+04
0,0284	4,23E+03	2,40E+03	3,68E+03	1,11E+05	6,33E+04	9,68E+04
0,0288	4,31E+03	2,45E+03	3,74E+03	1,14E+05	6,49E+04	9,92E+04
0,0292	4,38E+03	2,49E+03	3,81E+03	1,17E+05	6,65E+04	1,02E+05
0,0296	4,46E+03	2,53E+03	3,87E+03	1,20E+05	6,81E+04	1,04E+05
0,03	4,53E+03	2,57E+03	3,94E+03	1,23E+05	6,97E+04	1,07E+05
0,0304	4,61E+03	2,62E+03	4,00E+03	1,25E+05	7,13E+04	1,09E+05
0,0308	4,68E+03	2,66E+03	4,07E+03	1,28E+05	7,30E+04	1,12E+05
0,0312	4,76E+03	2,70E+03	4,14E+03	1,31E+05	7,46E+04	1,14E+05
0,0316	4,83E+03	2,75E+03	4,20E+03	1,34E+05	7,63E+04	1,17E+05
0,032	4,91E+03	2,79E+03	4,27E+03	1,37E+05	7,80E+04	1,19E+05
0,0324	4,99E+03	2,83E+03	4,34E+03	1,40E+05	7,97E+04	1,22E+05
0,0328	5,07E+03	2,88E+03	4,40E+03	1,43E+05	8,15E+04	1,25E+05
0,0332	5,14E+03	2,92E+03	4,47E+03	1,46E+05	8,32E+04	1,27E+05
0,0336	5,22E+03	2,97E+03	4,54E+03	1,50E+05	8,50E+04	1,30E+05
0,034	5,30E+03	3,01E+03	4,60E+03	1,53E+05	8,68E+04	1,33E+05
0,0344	5,38E+03	3,06E+03	4,67E+03	1,56E+05	8,85E+04	1,35E+05
0,0348	5,45E+03	3,10E+03	4,74E+03	1,59E+05	9,04E+04	1,38E+05
0,0352	5,53E+03	3,14E+03	4,81E+03	1,62E+05	9,22E+04	1,41E+05
0,0356	5,61E+03	3,19E+03	4,88E+03	1,65E+05	9,40E+04	1,44E+05
0,036	5,69E+03	3,23E+03	4,95E+03	1,69E+05	9,59E+04	1,47E+05
0,0364	5,77E+03	3,28E+03	5,01E+03	1,72E+05	9,78E+04	1,49E+05
0,0368	5,85E+03	3,32E+03	5,08E+03	1,75E+05	9,96E+04	1,52E+05
0,0372	5,93E+03	3,37E+03	5,15E+03	1,79E+05	1,02E+05	1,55E+05
0,0376	6,01E+03	3,41E+03	5,22E+03	1,82E+05	1,03E+05	1,58E+05
0,038	6,09E+03	3,46E+03	5,29E+03	1,85E+05	1,05E+05	1,61E+05
0,0384	6,17E+03	3,51E+03	5,36E+03	1,89E+05	1,07E+05	1,64E+05
0,0388	6,25E+03	3,55E+03	5,43E+03	1,92E+05	1,09E+05	1,67E+05
0,0392	6,33E+03	3,60E+03	5,50E+03	1,96E+05	1,11E+05	1,70E+05
0,0396	6,41E+03	3,64E+03	5,57E+03	1,99E+05	1,13E+05	1,73E+05
0,04	6,49E+03	3,69E+03	5,64E+03	2,03E+05	1,15E+05	1,76E+05

Таблица 7. Расчетные данные для CO₂

T	R = 0,01		5R = 0,05		10R = 0,1	
	t	l	t	l	t	l
243	1318	20588	9852	344198	23431	1157741
244	1292	20193	9663	337602	22982	1135554
245	1268	19814	9481	331258	22550	1114214
246	1245	19449	9306	325150	22134	1093671
247	1222	19097	9138	319267	21734	1073882
248	1200	18757	8976	313595	21348	1054804
249	1180	18430	8819	308123	20975	1036400
250	1159	18114	8668	302841	20616	1018633
251	1140	17809	8522	297739	20268	1001470
252	1121	17514	8381	292807	19933	984881
253	1103	17229	8244	288037	19608	968836
254	1085	16952	8112	283420	19294	953309
255	1068	16685	7984	278951	18989	938274
256	1051	16426	7860	274620	18695	923708
257	1035	16175	7740	270423	18409	909589
258	1020	15932	7623	266352	18132	895897
259	1004	15695	7510	262402	17863	882611
260	990	15466	7401	258567	17602	869713
261	976	15243	7294	254843	17348	857187
262	962	15027	7190	251225	17102	845017
263	948	14816	7090	247708	16862	833186
264	935	14612	6992	244287	16630	821681
265	922	14413	6897	240959	16403	810488
266	910	14219	6804	237721	16183	799594
267	898	14030	6714	234567	15968	788988
268	886	13847	6626	231496	15759	778657
269	875	13668	6540	228504	15555	768591
270	864	13493	6457	225587	15357	758780
271	853	13323	6375	222743	15163	749214
272	842	13157	6296	219969	14974	739883
273	832	12995	6218	217262	14790	730780

Таблица 8. Расчетные данные для C_3H_8

T	R = 0,004		5R = 0,02		10R = 0,04	
	t	l	t	l	t	l
243	419	4142	3134	69249	7454	232925
244	411	4063	3074	67922	7311	228461
245	403	3986	3016	66646	7173	224168
246	396	3913	2960	65417	7041	220035
247	389	3842	2907	64233	6914	216054
248	382	3774	2855	63092	6791	212215
249	375	3708	2805	61991	6672	208513
250	369	3644	2757	60928	6558	204938
251	363	3583	2711	59902	6448	201485
252	357	3524	2666	58910	6341	198147
253	351	3466	2623	57950	6237	194919
254	345	3411	2580	57021	6137	191796
255	340	3357	2540	56122	6041	188771
256	334	3305	2500	55251	5947	185840
257	329	3254	2462	54406	5856	183000
258	324	3205	2425	53587	5768	180245
259	320	3158	2389	52792	5682	177572
260	315	3112	2354	52021	5599	174977
261	310	3067	2320	51272	5519	172457
262	306	3023	2287	50544	5440	170008
263	302	2981	2255	49836	5364	167628
264	297	2940	2224	49148	5290	165313
265	293	2900	2194	48478	5218	163062
266	289	2861	2164	47827	5148	160870
267	286	2823	2136	47192	5080	158736
268	282	2786	2108	46575	5013	156658
269	278	2750	2080	45972	4948	154632
270	275	2715	2054	45386	4885	152659
271	271	2680	2028	44813	4823	150734
272	268	2647	2003	44255	4763	148857
273	265	2615	1978	43711	4705	147025