

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи студентів та виконання практичних  
робіт з дисципліни

**ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ**

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»  
та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»)

**Напрямок підготовки 6.040105  
«Гідрометеорологія»**

**«Затверджено»**

на засіданні методичної комісії ГМІ  
протокол №\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014р.  
Директор ГМІ \_\_\_\_\_ Овчарук В.А.

Затверджено

на засіданні каф. Фізики атмосфери  
та кліматології

Протокол №\_\_ від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014р.

Зав. кафедрою  
проф. Степаненко С.М. \_\_\_\_\_

**Одеса 2014**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи студентів та виконання практичних  
робіт з дисципліни

**ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ**

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»  
та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»)

***Напрямок підготовки 6.040105  
«Гідрометеорологія»***

**Одеса 2014**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до самостійної роботи студентів та виконання практичних  
робіт з дисципліни

**ПРИКЛАДНА МЕТЕОРОЛОГІЯ**

(блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»  
та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»)

***Напрямок підготовки 6.040105  
«Гідрометеорологія»***

**«Затверджено»**  
на засіданні методичної комісії ГМІ  
протокол № \_\_\_ від « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2014р.

**Одеса 2014**

Методичні вказівки до самостійної роботи студентів та виконання практичних робіт при вивченні дисципліни «Прикладна метеорологія» з модулями «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» для студентів III курсу денної форми навчання рівень підготовки – бакалавр, ПДВ ГМ-15 / Данова Т.Є., Прокоф'єв О.М. – Одеса, ОДЕКУ, 2014. – 53 с.

## ЗМІСТ

<b>1</b>	<b>ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА</b> .....	5
1.1	Передмова.....	5
1.2	Зміст блоку змістовних модулів дисципліни .....	5
1.2.1	Зміст блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»....	5
1.2.2	Зміст блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси».....	6
1.3	Перелік навчальної літератури.....	7
1.4	Перелік знань та вмінь студента.....	8
<b>2</b>	<b>ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА</b> .....	10
2.1	Загальні поради.....	10
2.2	Повчання по вивченню теоретичної частини курсу.....	10
2.2.1	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 1: «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері».....	10
2.2.2	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 2: «Хмари. Атмосферна електрика. Опади.».....	16
2.2.3	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси», лекційний модуль № 1: «Фазові переходи води в атмосфері та шляхи управління ними. Турбулентні струмені в атмосфері.».....	24
2.2.4	Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси», лекційний модуль № 2: «Управління процесами хмаро та опадоутворення. Розсіювання туманів. Вплив на електричні процеси в хмарах.».....	31
2.3	Повчання по вивченню практичної частини курсу.....	39
2.3.1	Повчання по виконанню практичного змістовного модулю блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів».....	39
2.3.2	Повчання по виконанню практичного змістовного модулю блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси».....	44
<b>3</b>	<b>ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ СТУДЕНТІВ</b>	50
3.1	Методика оцінки всіх видів підготовки студентів .....	50
3.2	Перелік базових знань та вмінь.....	52

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Передмова

Блоки змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» дисципліни «Прикладна метеорологія» присвячені дослідженню закономірностей хмаро- та опадоутворення та фізичних принципів різноманітних методів впливу, оцінки можливості управління атмосферними процесами, яке набуває величезного значення під час глобальних кліматичних змін.

Роль хмар в життєдіяльності людини величезна. Без них не існувало б умов, що забезпечують життя людини на Землі. Хмари покривають дещо більше половини небозводу і впливають не тільки на круговорот води в природі, але і на багато процесів, що протікають в атмосфері і формують погоду: на самоочищення атмосфери, на проходження в атмосфері електромагнітних хвиль, а також – на тепловий баланс системи Земля - атмосфера та ін. Гостра необхідність в відомостях про геометричні, фізичні та географічні характеристики, просторово-часову мінливість параметрів хмар з'явилася у фахівців, які працюють в області прогнозування погоди, вивчення клімату і його моделювання, активних впливів на атмосферні процеси, космічних досліджень, авіаційної та радіолокацій техніки, супутникової метеорології і ін.

Блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» дисципліни «Прикладна метеорологія» належить до професійно-орієнтованого циклу дисциплін підготовки фахівців зі спеціальності 6.040105 «гідрометеорологія».

Метою дисципліни є підготовка фахівців, які володіють глибокими теоретичними знаннями в галузі фізики хмар та опадів й фізичних основи впливу на атмосферні процеси.

Кількість навчальних годин визначається освітньо-професійною програмою.

1.2 Зміст блоків змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» дисципліни «Прикладна метеорологія»

1.2.1 Зміст блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» дисципліни «Прикладна метеорологія»

### **Змістовний модуль № 1.**

#### **Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері.**

Тема 1. Вода в атмосфері. Будова молекул водяної пари. Сили, які

призводять до об'єднання молекул водяної пари у комплекси. Нестійкі та стійкі комплекси молекул водяної пари.

Тема 2. Конденсація водяної пари в атмосфері. Ймовірність утворення зародків нової фази у гомогенному середовищі. Гетерогенна конденсація. Атмосферні ядра конденсації.

Тема 3. Конденсаційне зростання та випаровування крапель в атмосфері. Рівняння переносу пари та тепла в атмосфері. Роль конвективних потоків тепла і вологості.

Тема 4. Кристалізація переохолоджених крапель. Ймовірність виникнення твердої фази у гомогенному середовищі. Рівняння швидкості кристалізації для монодисперсної хмари. Ймовірність замерзання крапель різних розмірів у полідисперсній хмарі.

## **Змістовний модуль № 2.**

### **Хмари. Атмосферна електрика. Опади.**

Тема 1. Динаміка утворення шаруватоподібних хмар. Фізичні умови утворення хвилеподібних хмар.

Тема 2. Купчасті хмари. Елементи конвекції. Динаміка ненасиченого терміка. Динаміка вологих терміків. Стадії розвитку купчасто-дошових хмар. Класифікація хмар.

Тема 3. Електричне поле тропосфери. Механізм утворення зарядів на хмарних краплях і кристалах.

Тема 4. Електрична структура грозової хмари. Виникнення блискавок у грозових хмарах.

Тема 5. Процеси укрупнення хмарних елементів і утворення опадів. Коефіцієнт захоплення. Гравітаційний, броунівський, електричний, гідродинамічний ефекти коагуляції.

Тема 6. Опади з шаруватоподібних хмар. Механізм утворення зливових опадів. Опади у тропіках.

## 1.2.2 Зміст блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» дисципліни «Прикладна метеорологія»

### **Змістовний модуль № 1.**

#### **Фазові переходи води в атмосфері та шляхи управління ними. Турбулентні струмені в атмосфері.**

Тема 1. Основні положення теорії фазових переходів. Кристалізуючі дії холодореагентів. Гігроскопічні та поверхнево-активні речовини.

Тема 2. Конденсаційне та коагуляційне зростання часток у хмарах. Трансформація спектра хмарних крапель при внесенні реагентів, теорія процесів опадоутворення.

Тема 3. Основні властивості вільних турбулентних струменів. Стимулювання атмосферної конвекції. Метеотрон. Чисельні моделі хмарної конвекції. Використання вільних струменів для очистки локальних повітряних басейнів від забруднення.

Тема 4. Пасивні струмені. Закономірності розповсюдження реагентів.

### **Змістовний модуль № 2.**

#### **Управління процесами хмаро та опадоутворення. Розсіювання туманів. Вплив на електричні процеси в хмарах.**

Тема 1. Технічні засоби активних впливів на хмари. Контроль результатів впливу.

Тема 2. Проблема збільшення опадів на значної території. Викликання опадів із хмар не конвективних форм. Викликання опадів із конвективних хмар.

Тема 3. Фізика утворення граду та шляхи запобігання градобою. Організація робіт із запобігання граду. Динамічні методи руйнування хмар.

Тема 4. Вплив на тропічні урагани. Енергія ураганів. Можливі шляхи управління ураганами.

Тема 5. Видимість у тумані. Методи розсіювання туманів. Використання ПАР.

Тема 6. Методи спостереження за електричним станом хмар. Методи послаблення грозової активності.

### 1.3 Перелік навчальної літератури

#### Основна

1. Данова Т.Е Фізичні основи впливу на атмосферні процеси. Навчальний посібник, реком. МОН України для студ. ВНЗ. – Одеса: ОДЕКУ, 2010. – 128 с.
2. Данова Т.Є. Фізичні основи впливу на атмосферні процеси. Конспект лекцій. – 2006. – 98 с.
3. Данова Т.Є. Фізика хмар. Конспект лекцій. – 2006. – 131 с.
4. Школьнік Є.П. Фізика атмосфери. Підручник. – Одеса: ОГМІ, 1977. – 698 с.
5. Роджерс Р.Р. Кратний курс фізики облаков. /Пер. с англ. под ред. И.П. Мазина/. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.
6. Мазин И.П., Шметер С.М. Облака, строение и физика образования. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.
7. Облака и облачная атмосфера. /Под ред. И.П. Мазина, А.Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 632с.



8. Бекряев В.И. Практикум по физическим основам воздействия на атмосферные процессы. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 144 с.

#### Додаткова

1. Шметер С.М. Физика конвективных облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 289 с.
2. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозное электричество. 2-е изд. – Л.: Гидрометеиздат, 1954. – 401 с.
3. Седунов Ю.С. Физика образования жидкокапельной фазы в атмосфере. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 207 с.
4. Тлисов М.И. Физические характеристики града и механизм его образования. С.-П.: Гидрометеиздат, 2002. – 386 с.
5. Сулаквелидзе Г.К., Глушкова Н.И., Федченко Л.М. Прогноз града, гроз и ливневых осадков. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 187 с.

#### 1.4 Перелік знань та вмінь студента

В результаті вивчення блоку змістовних модулів студенти повинні знати:

- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміку формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структуру полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- основні фізичні закономірності розвитку атмосферних процесів, шляхи управління атмосферними процесами;
- кристалізуючу дію холодореагентів, гігроскопічні та поверхнево-активні речовини;
- трансформацію спектру хмарних крапель при внесенні реагентів;
- основні властивості вільних турбулентних струменів; сучасні методики впливу;
- механізм утворення грози;
- технічні засоби активного впливу;
- засоби активної і пасивної локації для спостереження за хмарними системами;

- показники оперативної оцінки фізичної ефективності і управління активним впливом;
- процеси, які відбуваються в хмарі після введення кристалізуючого реагенту;

В результаті вивчення блоку змістовних модулів студенти повинні

вміти:

- моделювати умови створення крапель опадів;
- моделювати умови створення і розвитку хмар;
- розраховувати зростання крапель та граду у потужних купчасто-дощових хмарах;
- аналізувати розвиток сухого струменю метеотрону при різних умовах;
- розраховувати процес розповсюдження реагенту при різних засобах внесення у хмарах;
- розраховувати енергетичні витрати, які необхідні для розсіяння туманів понад ВПС;
- розраховувати прояснення туману при внесенні кристалізуючих реагентів;
- розраховувати прояснення туману при внесенні гігроскопічних реагентів.
- виконувати приблизні розрахунки напруженості електричного поля до впливу та після впливу.

## 2 ОРГАНІЗАЦІЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТА

### 2.1 Загальні поради

Блоки змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» дисципліни «Прикладна метеорологія» вивчається після того, як студенти опанували такі дисципліни: «Астрономія», «Фізика атмосфери», «Методи обробки та аналізу гідрометеорологічної інформації», «Синоптична метеорологія». Знання, що набули студенти в процесі вивчення цих дисциплін, необхідні їм для розуміння положень, які викладаються у даному курсі.

Метою даних методичних вказівок є допомога студенту при самостійному вивченні дисципліни та підготовці до практичних робіт.

Для самостійного вивчення дисципліни рекомендовано користуватися навчальною літературою, яка є в бібліотеці університету та на кафедрі фізики атмосфери та кліматології. Поточна та підсумкова оцінка рівня знань студентів здійснюється за модульною системою. Теми теоретичної частини методичних вказівок відповідають розділам робочої програми.

### 2.2 Повчання по вивченню теоретичної частини курсу

#### 2.2.1 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 1: «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері»

#### ЛІТЕРАТУРА [3, С. 9-33]

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів.

Водяна пара на відміну від інших газів, при температурах повітря, які спостерігаються в атмосфері, може змінювати свій агрегатний стан, переходячи у рідкий (воду), чи твердий стан (лід). Різні фази води, тобто фізично однорідні частини системи, які здатні переходити з одного стану в інший, представлені на рисунку 2.1. Для кожного газу існує критична температура  $T_{кр}$ . Якщо  $T > T_{кр}$ , то газ не може перейти в

інший фазовий стан, незважаючи на те, при якому атмосферному тиску він перебуває. Для водяної пари  $t_{кр} = 374^\circ \text{C}$ , звичайно, що в атмосфері  $T < T_{кр}$ . Ця властивість водяної пари визначає специфічні характеристики різних фаз води.

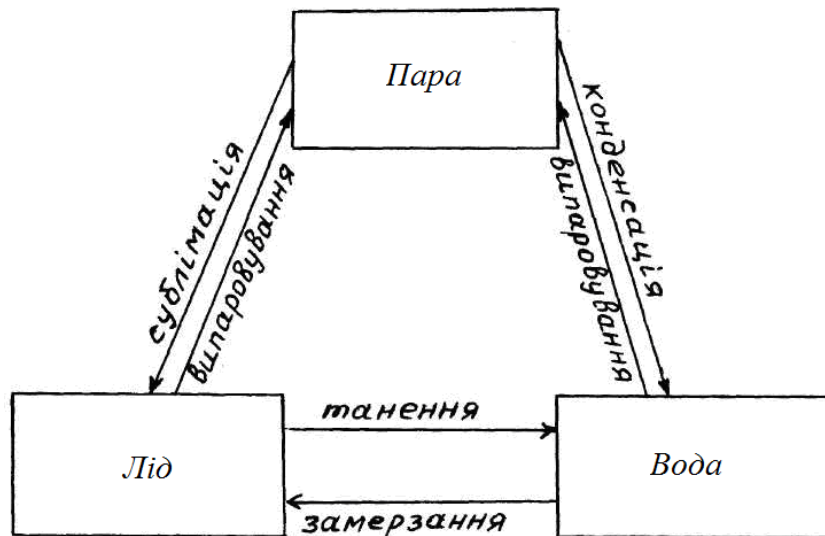


Рисунок 2.1 – Фазові стани води

Однією із характерних властивостей частинок твердої або рідкої фаз є поверхневий натяг. На поверхні розділу, наприклад, води і водяної пари є шар молекул, який значно відрізняється за своїми властивостями від інших шарів молекул у воді. Молекули, що розташовуються у середині води, зазнають рівномірну дію із боку оточуючих молекул. Рівнодіюча цих молекулярних сил дорівнює нулю. Дія молекулярних сил на молекули, які розташовані на межі розділу двох середовищ, суттєво відрізняється, в цьому випадку сили спрямовані у середину поверхні. Тоді на межі двох фаз зосереджується надлишок енергії відносно енергії тих об'ємних частин, які утворюють поверхневий шар [3]. Очевидно,

$$u_c = u_1 + u_2 + u', \quad (2.1)$$

де  $u_c$  – енергія (потенціал) усієї системи,  
 $u_1$  – енергія (потенціал) водяної пари (фаза 1),  
 $u_2$  – енергія (потенціал) води (фаза 2),  
 $u'$  – надлишок енергії.  
 Звідси надлишок енергії дорівнює

$$u' = u_c - (u_1 + u_2). \quad (2.2)$$

Питома поверхнева енергія, яка відповідає роботі утворення одиниці поверхневого шару, визначається як відношення надлишку енергії до площі поверхні розділу  $F$

$$\sigma = \frac{u'}{F} = \frac{u_c - (u_1 + u_2)}{F} \quad (2.3)$$

і називається поверхневим натягом. Він чисельно дорівнює роботі, яка потрібна, щоб розтягнути з води і водяної пари кількість молекул, необхідних для утворення  $1 \text{ м}^2$  поверхневого шару води.

Поверхневий натяг залежить від температури. Ця залежність для води має вигляд:

$$\sigma = \sigma_0(1 - 0.002t), \quad (2.4)$$

де  $\sigma_0 = 75,64 \frac{\text{мДж}}{\text{м}^2}$  – поверхневий натяг при температурі  $t = 0,0^\circ \text{C}$ .

Комплекс із п'яти молекул  $\text{H}_2\text{O}$  можна розглядати як сформовану ембріональну краплину, оскільки з молекулою, що знаходиться у середині цього комплексу, не може безпосередньо зв'язуватись жодна інша молекула водяної пари. У ньому всі крайні молекули утримуються силами зчеплення з центральною молекулою, яка ізольована від вільних молекул водяної пари. Але в такому комплексі  $(\text{H}_2\text{O})_5$  поверхневі сили ще не можуть бути стійкими, оскільки відрив навіть однієї молекули руйнує зазначену симетрію.

У середовищі водяної пари безперервно відбувається утворення та руйнування комплексів молекул. Деякі з них можуть мати властивості зародкової краплі. Елементарний зародок, або ембріональна краплина, може бути стійким і збільшуватись з часом, або нестійким і руйнуватись.

Фолмер на основі розрахунків показав, що спонтанна конденсація у гомогенному середовищі водяної пари можлива лише при пересиченнях більших ніж чотирикратне. Досліди в адіабатичній камері Вільсона показали, що у пароповітряному середовищі при відсутності сторонніх домішок конденсація водяної пари відбувається при восьмикратному пересиченні [3]. Таким чином, для спонтанного утворення в гомогенному середовищі водяної пари потрібне 4-8 кратне пересичення. Таких пересичень в атмосфері не буває. Навіть усередині купчастої хмари у висхідному потоці пересичення досягають соті частки процента. Але в атмосфері конденсація водяної пари відбувається. Річ у тому, що реальна атмосфера не є гомогенною. Вона

вмістить велику кількість аерозольних часток. Деякі з них виступають у ролі зародків нової фази. Тверді змочуючі частки спонтанно покриваються водяною плівкою, а соляні частки, адсорбуючи молекули водяної пари, перетворюються у краплі розчину солі. В першому та другому випадках молекули водяної пари будуть конденсуватись вже на готовій рідкій поверхні, розміри якої порівняні з великим зародком. При цьому відпадає необхідність витрати енергії на утворення первинної асоціації молекул. Необхідна лише витрата її на зростання краплі від розміру аерозольної частинки до розміру, коли крапля приходить до стану рівноваги з оточуючим пароповітряним середовищем. Аерозольні частинки, на яких відбувається конденсація водяної пари, називаються ядрами конденсації.

Численні спостереження показали, що в атмосфері завжди присутні ядра таких розмірів і в таких кількостях, які достатні для утворення хмар при пересиченнях, характерних для реальної атмосфери. Атмосферні аерозольні частки можна розділити на три групи.

1. Тверді ядра, нерозчинні та не змочуючі (пилинки, частки піщинок, кварцу, вугілля тощо). Конденсація водяної пари на них можлива, але при великих пересиченнях. В атмосферних умовах вони у ролі ядер конденсації не виступають.

2. Тверді частинки нерозчинні, але змочуючі. Такі частинки спонтанно адсорбують вологу і в залежності від існуючої вологості та ступеня змочуваності покриваються одним або більшою кількістю молекулярних шарів води. Якщо частки мають неправильну форму, або крихку структуру, то у поглибленнях і порах відбувається капілярна конденсація або адсорбція навіть при недосиченнях.

3. Краплі розчинів. У вологій атмосфері тверді розчинні гігроскопічні частинки швидко перетворюються у краплі розчинів. Це найбільш важлива група ядер конденсації. Вони надходять в атмосферу при спалюванні вугілля, яке вмістить від 0,3 до 20 % сірки. Із сірки в результаті спалювання виникає двооксид сірки  $SO_2$ , який за допомогою різних окислювачів може перетворитися на сірчаний ангідрид  $SO_3$  і потім на сірчану кислоту  $H_2SO_4$ , розчинну і дуже гігроскопічну.

Гігроскопічні ядра конденсації утворюються також із морських бризків і піни. Випаровування їх приводить до утворення дрібних частинок морської солі. Морська сіль складається із 77,8 %  $NaCl$ , 10,9 %  $MgCl_2$  та невеликої кількості сірчаноокислих магнію, калію й кальцію.

Ядра конденсації утворюються також при вивітрюванні земної поверхні, при лісових пожежах, вулканічній діяльності тощо. Із загальної кількості ядер конденсації припадає: на морські ядра – 20 %,

продукти спалювання – 40 %, частки ґрунту – 20 %, ядра невідомого походження – 20 %.

Концентрація ядер конденсації в атмосфері коливається у широких границях. Середнє число ядер в  $1 \text{ см}^3$  поблизу від земної поверхні дорівнює: близько 150000 – у великих містах, 35000 – у невеликих містах, 9500 – у сільській місцевості, 940 – над океанами і в горах. Більшість із них не є активними і не беруть участі у процесах конденсації.

Як показали спостереження, в атмосфері зустрічаються ядра конденсації, розміри яких змінюються в широких межах – від  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$  см. За розмірами ядра конденсації поділяються на три групи: частки радіусом від  $5 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  см, які називають ядрами Айткена; частки радіусом від  $2 \cdot 10^{-5}$  до  $10^{-4}$  см, що називаються крупними ядрами; частки радіусом більше  $10^{-4}$  см. Останні мають назву гігантських ядер конденсації. В атмосфері найбільшу концентрацію мають ядра Айткена. У середньому в  $1 \text{ см}^3$  їх вмістить 42500, крупних ядер – 132, а гігантських – 2. Незважаючи на те, що кількість крупних і гігантських ядер мала порівняно з кількістю ядер Айткена, внесок їх у загальну масу ядер найбільший.

Помітні концентрації льодяних кристалів починають утворюватися у хмарі, коли температура падає нижче  $-15,0^\circ \text{C}$ . Для гомогенної кристалізації ці умови не виявляються сприятливими, це означає, що відбувається гетерогенне льодоутворення. Вода у контакті з більшістю речовин буде замерзати при температурах вище  $-40,0^\circ \text{C}$ , і пара буде сублимуватись на більшості речовин при пересиченнях і переохолодженнях більш низьких, ніж потрібно для гомогенного льодоутворення. Отже, зародженню льоду у переохоложеній воді й пересиченому середовищі сприяє присутність сторонніх поверхонь або завислих часток. Дослідження зростання окремих кристалів показує, що воно найбільш легко відбувається на ядрах, які мають слабку розчинність і гексагональну структуру кристалічної ґратки, котра близька до структури природного льоду. Існують три види атмосферних льодяних ядер: ядра сублимації, ядра замерзання й контактні ядра.

Роль атмосферних ядер льодоутворення полягає в тому, що вони полегшують фазовий перехід вода-лід, або водяна пара-лід. З цієї точки зору, можна прийняти таку класифікацію процесів замерзання:

а) Кристалізація при температурі вище  $-32,0^\circ \text{C}$ . У цьому випадку тверді нерозчинні ядра, змочені водою, утворюють зародкові кристали шляхом замерзання їх водяної оболонки. Наявність твердих часток просто полегшує енергетичний перехід вода-лід.

б) Кристалізація в інтервалі температур від  $-32,0^{\circ}$  до  $-41,0^{\circ}$  С. У цьому діапазоні відбувається замерзання крапель розчинів солей. Під впливом низьких температур розчин солей стає пересиченим, що приводить до випадання кристаликів солі в осадок. Ці кристалики й відіграють роль ядер замерзання.

в) Кристалізація при  $T < -41,0^{\circ}$  С може бути наслідком спонтанного замерзання крапель води або чистих розчинів солей без участі ядер замерзання шляхом випадкового з'єднання молекул переохолодженої води в агрегати льодяної фази.

г) Кристалізація при температурах  $-65,0^{\circ}$  С і нижче відбувається шляхом прямої сублімації водяної пари на твердих незмочуючих ядрах, або спонтанного замерзання дрібних крапель, як у пункті в).

#### ЛІТЕРАТУРА

[3], с. 9 - 33.

#### ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які фазові переходи відбуваються в атмосфері?
2. Вкажіть сили взаємодії, які виникають між молекулами, та причини, що їх спонукають.
3. Опишіть структуру молекули  $\text{H}_2\text{O}$ .
4. Яким рівнянням описується взаємна потенційна енергія між двома молекулами  $\text{H}_2\text{O}$ ?
5. Як пов'язана ефективна відстань із структурою зародка нової фази?
6. Що собою являє потенційна крива?
7. На якій відстані відбувається взаємодія між молекулами?
8. Що собою являють зародки рідкої та твердої?
9. Що таке поверхневий натяг? Від чого залежить його величина? Коли він виникає?
10. Як залежать умови росту зародка рідкої фази від кривизни поверхні краплі?
11. Яке середовище вважається гомогенною, а яка – гетерогенною?
12. Що таке критичне пересичення?
13. Від чого і як залежить величина критичного радіуса краплі?
14. Які відомі класифікації ядер конденсації?
15. Які існують джерела атмосферних ядер конденсації?
16. Запишіть систему рівняння, що описує перенос водяної пари і тепла при конденсаційному зростанні краплі.
17. Від чого і як залежить величина потоку пари до (від) поверхні краплі у стаціонарних умовах?



18. У чому складається особливість конденсації водяної пари у нестационарних умовах від стаціонарних?
19. Як відрізняється конденсаційне зростання сукупності крапель від конденсаційного зростання окремої краплі?
20. Визначити сенс функції розподілу крапель за розмірами.
21. Які закони описують розподіл крапель за розмірами?
22. Як записується розподіл Хргіана-Мазіна?
23. Як проходить льодоутворення у гомогенному середовищі водяної пари?
24. Від чого і як залежить ймовірність утворення твердої фази у гомогенному середовищі?
25. Як відбувається процес льодоутворення у реальній атмосфері.
26. Що таке ядра сублімації?
27. Від чого і як залежить швидкість кристалізації?
28. Які форми кристалів відомі та як залежить швидкість зростання кристалів від їх форми?

#### 2.2.2 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів», лекційний модуль № 2: «**Хмари. Атмосферна електрика. Оподи.**»

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- кінематику формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміку формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структуру полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- механізм утворення грози.

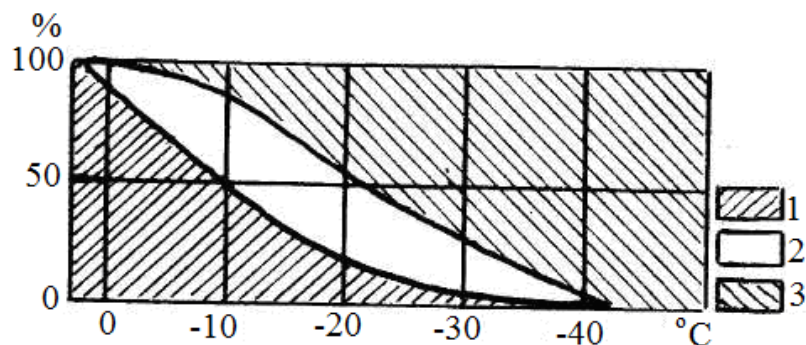
У краплинних хмарах реальна концентрація льодяних частинок не перебільшує  $1\text{л}^{-1}$ , тобто менша порівняно з концентрацією крапель  $10^5 - 10^6$  разів. Крім краплинних хмар при від'ємних температурах спостерігаються змішані й кристалічні хмари. Змішанні хмари складаються з крапель із кристалів. Концентрації льодяних частинок у змішаних хмарах можуть бути зіставленими з концентрацією рідких хмарних елементів. При відсутності вертикальних рухів змішані хмари нестійкі: краплі замерзають або випаровуються, а кристали зростають. У активній стадії розвитку хмар, коли присутні висхідні токи, які

забезпечують приплив надлишкової вологи, змішана хмара може існувати необмежений час, якщо стік водяної пари на кристали не перевищує її припливу.

Кристалічними є хмари, які складаються з елементів твердої фази води. Фазова структура хмари не буває нерухомою. У процесі життя хмари кристали зароджуються, ростуть і випадають, краплі утворюються й випаровуються. Таким чином, фазовий стан хмари може бути різним у різних точках хмари і змінюватись за часом. Фазовий стан хмари – одна із найважливіших характеристик при від'ємних температурах, які у великій мірі визначають активність процесів хмароутворення й процесів утворення опадів. Зазначені процеси найбільш активні при змішаній структурі хмари. У цьому сенсі, найпасивнішими є кристалічні хмари.

Фазовий стан хмари залежить від багатьох факторів, але основні з них – це температура й вертикальні рухи. Характеристики цих рухів вимірювати дуже важко навіть тоді, коли вони обумовлюються турбулентністю атмосфери або тепловою конвекцією й мають значні величини.

Статистичні дані про повторюваність різних фазових станів хмар помірних широт при різних температурах дало змогу отримати залежність (рис. 2.2). При цьому хмари були віднесені до краплинних, кристалічних або змішаних у залежності від того, зустрічались або не зустрічались краплі чи кристали в експериментальних пробах хмарного повітря при польоті літака-лабораторії. Повторюваності, що наводяться на рис. 2.2, отримані для всіх досліджених хмар у цілому без поділу їх на форми.



- 1 – крапельні хмари;
- 2 – змішані хмари;
- 3 – кристалічні хмари

Рисунок 2.2 – Повторюваність (%) різного фазового стану хмар при різній температурі.

Відмінності у фазовому стані хмар різних форм визначаються температурним режимом, також впливають розташовані вище шари

хмар і товщина хмар. Повторюваність різного фазового стану хмар різних форм для помірних широт наводиться в табл. 1.

Загальною закономірністю даних, які містяться в табл. 1, є зменшення повторюваності краплинних хмар і збільшення повторюваності кристалічних хмар при зниженні температури. Але спостерігається суттєва різниця у повторюваності рідкої й твердої фаз у хмарах  $St$ ,  $Sc$  і  $Ac$  (перша група) і хмарах  $Ns$  і  $As$  (друга група).

Як взимку, так і влітку, а також у середньому за рік, у першій групі хмар повторюваність рідкої фази набагато більша, ніж у хмарах другої групи. З іншого боку, у хмарах другої групи значно зростає повторюваність змішаного фазового стану, особливо у шарувато-дошових хмарах, що є однією із основних причин утворення опадів із цих хмар.

Водністю хмар  $Q_w$  називають масу води, яка у сконденсованому стані вміститься в одиниці об'єму повітря. Ця характеристика мікроструктури має розмірність г/см<sup>3</sup>. Питомою водністю  $\delta_w$  називають масу води, яка вміститься утримується в одиниці маси повітря – г/г. У випадку, коли хмара кристалічна, замість водності використовується характеристика, яку називають льодністю  $Q_l$ . Льодність – це маса кристалів льоду, які вмістяться в одиниці об'єму хмарного повітря.

Таблиця 2.1 – Середньорічна повторюваність (%) фазового стану хмар різних для помірних широт (по А.М. Боровикову)

Сезон	Фазовий стан хмар	Форми хмар				
		$St$	$Sc$	$Ns$	$Ac$	$As$
Літо	Краплинна	99,5	98,8	29	80	44
	Змішана	0,5	1,2	71	17	40
	Кристалічна	0	0	0	3	16
Зима	Краплинна	85	73	13	44	15
	Змішана	14	24	84	44	36
	Кристалічна	1	3	3	12	49
Рік	Краплинна	89	83	17	62	24
	Змішана	10	16	81	30	36
	Кристалічна	1	1	2	8	40

Хмари є одним з елементів кругообігу води в системі Земля-атмосфера. Утворення та еволюція хмар обумовлюються фізичними процесами, які розвиваються в атмосфері, з якої хмари отримують запаси водяної пари. Але, в свою чергу, хмари дуже впливають на розподіл характеристик атмосфери. По-перше, вони виступають у ролі регулятора радіаційних процесів, по-друге, вносять визначний внесок в

процеси перетворення енергії в атмосфері завдяки фазовим переходам води.

Незважаючи на те, що в атмосфері утримується в стані водяної пари біля 13 000 км<sup>3</sup> води, водяна пара у середньому перебуває в стані далекому від стану насичення. Біля земної поверхні відносна вологість повітря найчастіше дорівнює 60-70 % та зменшується в 2-3 рази в області тропопаузи. Тому для виникнення хмар повинен бути локальне зростання відносної вологості, завдяки якому у тій або іншій частині атмосфери водяна пара стала б насиченою. Крім того, потрібно, щоб у зоні насичення була достатньою кількість ядер конденсації або при низьких від'ємних температурах ядер льодоутворення. Зростання відносної вологості може обумовлюватись, припливом водяної пари чи зниженням температури, або під дією обох факторів разом. Причиною зниження температури можуть бути як адіабатичні, так і неадіабатичні процеси. Близьким до адіабатичного є процес охолодження повітря при вертикальних підйомах частинок повітря. Основними неадіабатичними процесами, які впливають на хмароутворення, є фазові переходи води, процес перетворення радіаційних потоків, турбулентний теплообмін атмосфери з підстильною поверхнею та сусідніми шарами атмосфери. Найбільш значним є внесок неадіабатичних процесів при утворенні низьких хмар шаруватих форм. Хмари шаруватих форм часто мають і внутрішньомасове походження, утворення хмар шаруватих форм може бути обумовлено не тільки упорядкованими висхідними рухами, але й іншими факторами, наприклад, атмосферою турбулентністю.

З точки зору процесів хмароутворення найбільший інтерес являють ті хвильові рухи, що виникають у шарах з інтенсивністю або дуже стійкою температурною стратифікацією, які часто називають затримуючими шарами, а також хвилі, що утворюються при обтіканні потоком гір або височин. Ці хвильові збурення в атмосфері називають внутрішніми гравітаційними хвилями, або хвилями Гельмгольца. Вони утворюються, коли при переході через затримуючий шар повітря відбувається розрив горизонтальної складової швидкості вітру разом із стрибкоподібним змінням густини повітря. Під впливом таких хвильових рухів за визначених умов можуть утворюватися хвильоподібні хмари, які мають вигляд поширеного по горизонталі на десятки і сотні кілометрів шару, який складається з валів, пасм, плит.

Купчасто-дощові хмари утворюються з потужно-купчастих, коли їх вершини проникають у шари атмосфери, де температура набагато нижча за 0° С, й заледенівають. Зледеніла верхня частина купчасто-дощової хмари (*Cb*) може залишатися куполоподібною – *Cv calv* (лисе), але частіше з неї викидаються пучки перистих хмар у вигляді парасолі або ковадла, так виникають *Cv cap* (волосаті), різновидністю яких є

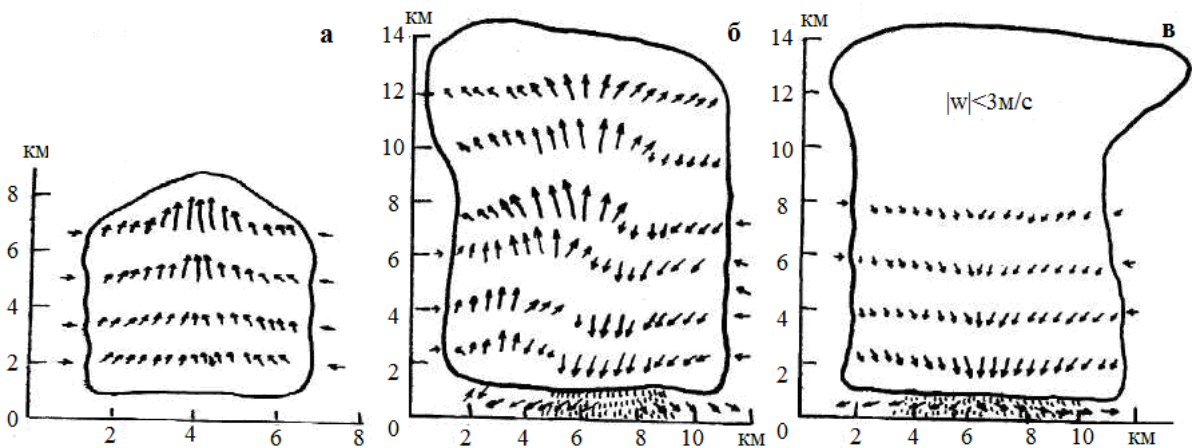
купчасто-дошові з ковадло *Cb inc*. Купчасто-дошові хмари складаються з одного або декількох конвективних осередків. Конвективний осередок включає область висхідного та компенсаційного низхідного потоків. Життєвий цикл осередку поділяють на три стадії в залежності від переважних напрямків вертикального руху повітря та його інтенсивності.

1) стадія купчастої хмари – характеризується висхідними рухами в більшій частині осередку;

2) стадія зрілості – характеризується наявністю як висхідних, так і низхідних рухів;

3) стадія розпаду – характеризується слабкими низхідними рухами у більшій частині осередку.

У стадії купчастої хмари, коли висхідні рухи зумовлюють зростання хмари, через її бокові поверхні затягується повітря та змішується з повітрям у висхідному потоці (рис. 2.3).



а) стадія cumulus (стадія зростання),

б) стадія зрілості,

в) стадія дисипації

Рисунок 2.3 – Еволюція *Cb* за Байєрсом та Брейамом

Оскільки рух вгору триває, відбувається концентрація великої кількості водяної пари й утворення крапель, а вище нульової ізотерми й кристалів. При відповідних умовах починають випадати опади, які стимулюють низхідні рухи, обумовлені в'язким опором повітря й охолодженням останнього при випаровуванні крапель. Це й є початком стадії зрілості хмари. Низхідний потік повітря досягає земної поверхні у виді відносно холодного ядра зони випадання дощу й розтікається над нею, змінюючи приземний напрямок вітру. На нижніх рівнях хмари низхідний потік напливає на висхідний і відтискує останній від області його зародження. Після цього починається стадія розпаду осередку. Загасання висхідного руху приводить до послаблення й поступового зникнення компенсаційних низхідних рухів.

Електричні процеси і процеси утворення опадів нерозривні. В умовах ясного неба електричне поле нижніх шарів атмосфери направлене вниз, це означає, що земна поверхня має від'ємний заряд, а сумарний заряд в атмосфері – додатний. Напруженість вертикального електричного поля додатна біля земної поверхні. Середнє її значення по земній кулі 120 В/м, над океанами – близько 130 В/м, над промисловими містами набагато більше – 300 В/м. Над сушею іонізація нижніх шарів відбувається за рахунок розпаду радіоактивних речовин повітря і земної кори, над океаном – космічне випромінювання.

Електропровідність повітря забезпечується рухливістю іонів і пропорційна їх концентрації. Провідність додатних іонів більша, ніж від'ємних. Рух додатних іонів вниз, а від'ємних – вгору під дією електричного поля ясного неба складає направлений вниз струм провідності, який прагне нейтралізувати від'ємний заряд землі. Заряд землі майже незмінний, що свідчить про процес його постійного відновлення.

Грозові хмари – це системи із зворотним зв'язком, в яких зміни фізичних параметрів гідрометеорів (концентрація, розмір, фазовий стан) викликають зміни електричних параметрів (зарядів електричного поля) і навпаки. Формування заряджених областей в хмарі відбувається під дією висхідних потоків і гравітаційних сил. Крупні краплі, падаючи, переносять вниз додатний заряд, захоплюючи за собою центр додатного заряду; разом з ним поступово опускається і центр від'ємного заряду (рис. 2.4).

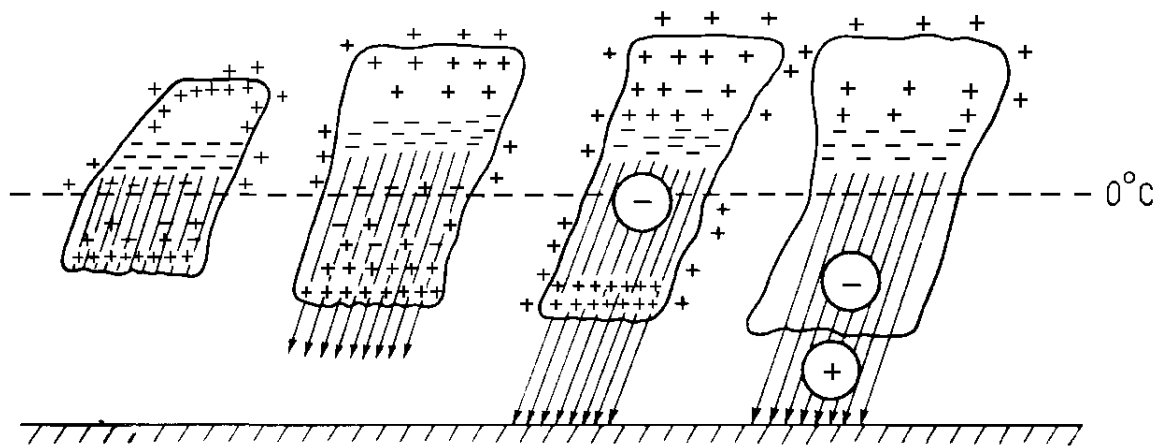


Рисунок 2.4 – Схема розвитку грози І.М. Імянітова

Утворенню заряджених областей в хмарах передують процеси, визначальні до електризації хмарних частинок і гідрометеорів.

Якщо процеси електризації в хмарах протікають достатньо інтенсивно і тривалий час, можливе накопичення зарядів грозової хмари,

між якими виникають сильні електричні поля, що приводять до розряду блискавок.

До електризації хмар можуть привести наступні процеси:

1. *Зарядження крапель в середовищі іонів* – захоплення хмарними краплями іонів призводить до заряду краплі, причому за рівної кількості від'ємних і додатних іонів краплі заряджаються від'ємно (через різну рухливість іонів).

2. *Електризація при контакті льодяних частинок* – при контакті відбувається обмін електронами та іонами до настання електричної рівноваги. При швидкому розриві контакту відбувається порушення рівноваги, яка викликає виникнення різниці потенціалів. В природних умовах контакт льодяних частинок здійснюється за наявності тертя. Знак та інтенсивність при цьому залежить від хімічного складу речовини, властивостей поверхні, температури, вологості повітря і т.п. В грозових хмарах процес зіткнення льодяних частинок за відсутності переохолоджених крапель спостерігається тільки у верхній частині хмари.

3. *Електризація при замерзанні води і розчинів* – між рідкою і твердою фазами утворюється різниця потенціалів, залежна від швидкості кристалізації та особливостей речовини. На величину заряду впливає різниця потенціалів між рідкою і твердою фазою розчину і умови відриву краплі.

4. *Електризація при руйнуванні замерзаючих крапель води* – виникають електричні заряди, при вибуху краплі дрібні осколки заряджаються від'ємно, а частина краплі, що залишилася, набуває додатного заряду.

5. *Електризація при зіткненні крупних льодяних частинок з краплями і льодяними переохолодженими кристалами* спостерігається в області як сухого, так і мокрого зростання льодяних частинок. Найінтенсивнішим є механізм електризації при одночасному зіткненні льодяних частинок і переохолоджених крапельок з поверхнею льоду. Механізм комплексний, знак та інтенсивність заряду залежать від співвідношення процесів.

6. *Балоелектричний ефект* – електризація при руйнуванні води. Виникає при зіткненні крупних крапель одна з одною, руйнуванні крупних крапель при падінні, таненні градин і відриві від них крапель, вириванні з них бульбашок повітря, зіткненні градин і льодяної крупи з крупними краплями і т.п.

7. *Електризація при спонтанному руйнуванні крапель при падінні* – крупні фрагменти завжди заряджаються додатно, дрібні – від'ємно.

8. *Електризація при руйнуванні крапель, які стикаються з твердими тілами (наприклад, крапель з градинами)* – інтенсивність

електризації залежить від розмірів крапель і від швидкості краплі у момент зіткнення.

9. *Електризація при руйнуванні повітряних бульбашок на поверхні води і при таненні льоду* – процес, можливий при підйомі крупних крапель в купчастій хмарі, їх переохолодженні і замерзанні вище рівня  $0^{\circ}\text{C}$  (повітря виділяється у вигляді бульбашок); при падінні граду або сніжинок нижче  $0,0^{\circ}\text{C}$ , коли звільнюється повітря, що міститься в льоді. Льодяні частинки при таненні набувають додатного заряду, величина якого велика. Бульбашки повітря, виходячи на поверхню і руйнуючись, відносять з собою від'ємний заряд. Величина заряду залежить від чистоти льоду, чим чистіший лід, тим більший заряд.

В основі всіх механізмів електризації лежать процеси, які призводять до первинного розділення зарядів.

Із-за різної реакції крапель на дію гравітаційних, електричних або аеродинамічних сил можуть відбуватися їхні зіткнення. При цьому, краплі можуть зливатися. Зливання крапель при їх падінні називають коагуляцією. Одним з основних ефектів із перелічених вище, є гравітаційний ефект, який приводить до падіння крапель різних розмірів з різною швидкістю. Відношення числа зливань до числа зіткнень називається коефіцієнтом злиття. Коагуляційне зростання крапель визначається коефіцієнтом захоплення, який дорівнює добутку коефіцієнтів зіткнення і злиття. Крім сили ваги, під дією якої краплі різних розмірів мають різну швидкість падіння, що приводить до гравітаційної коагуляції, існують й інші фізичні механізми, які обумовлюють злиття крапель. В залежності від характеру цих механізмів розглядають броунівську, турбулентну електростатичну та інші види коагуляції. У природі ці ефекти діють одночасно з гравітаційною коагуляцією. Причиною броунівських рухів крапель у хмарі є зіткнення їх з молекулами повітря. Крім броунівських рухів крапель на інтенсивність коагуляції впливають і електричні сили, що діють на краплі. Така коагуляція, як зазначалося вище, носить назву електростатичної. Вона обумовлюється або взаємодією частини крапель, які несуть на собі електричний заряд, або взаємодією крапель з електричним полем, якщо воно відрізняється від нуля.

#### ЛІТЕРАТУРА

[1], с. 100-103; [1], с. 37-122.

#### ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які процеси сприяють утворенню шарувато-подібних хмар. Як впливає турбулентність на процес утворення?
2. Що таке загальний вологовміст атмосфери?



3. Дайте характеристику фазового стану шаруватоподібних хмар, розмірам хмарних часток, водності та їх змінювання з висотою.
4. Наведіть класифікацію туманів за генетичними та морфологічними ознаками.
5. За яких умов відбувається утворення радіаційних туманів?
6. Які умови сприяють утворенню адвективних туманів?
7. Дайте характеристику фазового стану туманів, спектра, частинок та водності.
8. Які умови сприяють утворенню хвильоподібних хмар?
9. Які осередки називаються закритими, які – відкритими?
10. Які процеси приводять до утворення купчастої хмарності?
11. Пояснить метод частки.
12. Пояснить метод шару.
13. Класифікація купчасто-дощових хмар за даними радіолокаційних вимірювань.
14. Наведіть основні параметри одноосередкових, багатоосередкових та суперосередкових хмар.
15. Електричні процеси у хмарах.
16. Характеристика стану атмосфери “доброї погоди”.
17. Процеси електризації у грозовій хмарі.
18. Умови формування грозової електрики.
19. Дайте визначення коефіцієнтам зіткнення, злиття та захоплення.
20. Аеродинамічні умови зіткнення крапель.
21. Механізм гравітаційної коагуляції.
22. Механізм турбулентної коагуляції.
23. Механізм броунівської коагуляції.
24. Механізм гідродинамічної та градієнтної коагуляції.
25. Механізм електричної коагуляції.
26. Механізм акустичної коагуляції.
27. Від чого залежить швидкість падіння хмарних частинок у повітрі.
28. Основні сили, діючі на хмарну частинку.
29. Генетична класифікація опадів.
30. Морфологічна класифікація опадів.
31. Характеристики опадів у тропіках.

2.2.3 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси», лекційний модуль № 1: **«Фазові переходи води в атмосфері та шляхи управління ними. Турбулентні струмені в атмосфері.»**

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- основні фізичні закономірності розвитку атмосферних процесів, шляхи управління атмосферними процесами;
- кристалізуючу дію холодореагентів, гігроскопічні та поверхнево-активні речовини;
- трансформацію спектра хмарних крапель при внесенні реагентів;
- основні властивості вільних турбулентних струменів; сучасні методики впливу.

Температурна межа, нижче якої водяна пара переходить переважно в лід, залежить від пересичення, але діапазон зміни порівняно невеликий, приблизно від  $-30,0$  до  $-40,0^{\circ}\text{C}$ . Щоб спонтанно утворилися переважно льодяні частинки, необхідне охолодження пари з достатньо великою швидкістю до температури  $-30,0^{\circ}\text{C}$  і нижче.

Згідно розрахунків імовірність утворення льодяних частинок достатньо велика, якщо температура конденсації  $-30,0^{\circ}\text{C}$  і нижче. Це означає, що водяну пару, яка знаходиться в стані насичення в хмарі (тумані) при від'ємній температурі, необхідно ізобарично охолодити як мінімум до  $-30,0\dots-40,0^{\circ}\text{C}$ , щоб в ньому почали спонтанно утворюватися льодяні частинки. Для досягнення великої швидкості льодоутворення потрібні нижчі температури охолодження. Саме тому в якості реагентів використовують речовини, що мають низьку температуру кипіння ( $-60,0^{\circ}\text{C}$  і нижче).

В якості холодореагентів при впливі на хмари і тумани використовуються стислі під високим тиском або зріджені гази, а також кристалічні речовини з низькою температурою випаровування. Введення таких речовин в хмару (туман) призводить до локального зниження температури водяної пари, яке тим більше, чим нижча температура рівноваги речовини. Відомі речовини з більш низькою температурою рівноваги (нітроген, кисень, гідроген). Використання таких речовин дозволяє досягати більшого ефекту охолодження. Проте вибраний холодореагент повинен бути слабо розчинним у воді. Існують речовини, при введенні яких в хмару в *диспергованому* стані починається інтенсивна кристалізація. *Диспергування* – це розщеплювання (подрібнення) речовини.

Високу льодоутворювальну активність має  $\text{AgI}_2$ , аерозоль йодного срібла, що утворюється при термічній сублімації.

Характеристики активності реагенту:

1. Поріг кристалізації – максимальна температура, при якій кристалізація йде з помітною швидкістю.
2. Льодоутворювальна активність – число льодяних частинок, що утворюються в переохолодженій хмарі при диспергуванні одиниці маси реагенту при даній температурі за характерний час.

Активність і поріг активності залежать від фізико-хімічних властивостей реагенту, від температури і вологості повітря, від способу введення реагенту в хмару. Гетерофазні льодяні зародки на поверхні *AgI* можуть утворюватися як в результаті безпосереднього переходу водяної пари в лід, так і в результаті переходу пари у воду з подальшим утворенням площинного зародка льоду в плівці води на поверхні частинок *AgI*.

Умови високої активності реагентів:

1) добра їх здатність диспергувати, яка дозволяє отримати оптимальну сумарну поверхню аерозольних частинок реагенту;

2) частинки реагенту повинні бути високогігроскопічними – легко обволікатися водою.

*Гігроскопічність* – властивість речовин поглинати (сорбувати) вологу з навколишнього повітря. Ця властивість характерна водним розчинам солей *NaCl*, *CaCl<sub>2</sub>* і кислотам. Зниження пружності насичення над частинками, що містять вказані розчини, викликає потік пари до них і прискорює зростання крапель. Із зростанням крапель розчину концентрація солей або кислот падає і ефект гігроскопічності зменшується. Гігроскопічні речовини (реагенти) використовуються як стимулятори конденсаційних процесів в хмарах і туманах. На відміну від гігроскопічних речовин, які рівномірно розподіляються у всьому об'ємі краплі, *поверхнево-активні речовини (ПАР)* мають властивість нагромаджуватися в поверхневому шарі розчинника (біля поверхні розділу фаз) і змінюють його властивості:

1) знижують міжфазний натяг;

2) знижують пружність насичення пари в повітрі на межі з водним розчином ПАР;

3) зменшують механічну нестійкість води в диспергованому стані;

4) зменшують ефективність переходу молекул водяної пари в конденсуючий стан при наближенні їх до поверхні розчину ПАР (коефіцієнт конденсації або акомодатії);

5) ПАР знижує випаровування води, якщо в навколишньому просторі вологість менша насиченої.

При аналізі умов утворення опадів з чисто водяних хмар необхідно брати до уваги ряд чинників – температуру, водність, розміри хмарних крапель (характер розподілу за розмірами). Сукупність всіх цих чинників визначає область малих значень швидкості укрупнення крапель (потенційний бар'єр, що перешкоджає переходу хмари в дощову). Для подолання потенційного бар'єра, що перешкоджає утворенню опадів в хмарах з меншою водністю і більш холодних, буде потрібний значний розвиток хмари, яке призведе до збільшення водності, перерозподілу крапель за розмірами, укрупнення їх або сильне збільшення потужності хмар. Потенційний бар'єр зникає при появі в хмарі кристалів льоду. Потенційний бар'єр

характеризується мінімальними швидкостями росту падаючих в хмарі крапель, легко долається замерзлими краплями, якщо температура частини переохолодженої хмари низька. Чим ближча температура до  $0,0^{\circ}\text{C}$ , тим більше часу буде потрібно для подолання цього бар'єра.

Розрахунки показують, що в хмарах неконвективних форм частинки, що замерзли, починають падати вниз відразу після їх замерзання. В купчастих хмарах замерзлі краплі можуть підійматися вгору в залежності від швидкості висхідних рухів. В змішаних хмарах головна роль належить кристалізації, отже, штучна кристалізація – основа впливу на переохоложені хмари. Випаровування падаючих крапель в підхмарному шарі відбувається при вологості, значно меншій за ту, яка спостерігається в хмарі. Проте у міру випаровування крапель вологість в підхмарному шарі підвищується і збільшується «пробіг» падаючих крапель.

Теорія і досвід показують, що при  $t = -5,0\dots-7,0^{\circ}\text{C}$  і нижче єдиним параметром хмар неконвективних форм, від якого залежить успіх впливу, є вертикальна протяжність хмар. Якщо вона більше 400–800 м то, як природна, так і штучна кристалізація хмари забезпечує випадання опадів.

Головна причина – різниця  $E_v \sim E_{\text{лmax}}$  при  $t = -12,0^{\circ}\text{C}$  і швидко зменшується при  $t = 0,0^{\circ}\text{C}$ . Тому при  $\Delta E_{\text{max}}$  штучно створені льодяні частинки, які падають в переохоложеній хмарі, встигають вирости до значних розмірів та залежать від величини вертикального температурного градієнта  $\gamma$ . Якщо  $\gamma_{\text{ва}}$  великий, то хмара не дасть опадів при будь-якому кристалізуючому реагенті. Тому необхідно оцінити «підготовленість» хмари до опадоутворення.

Якщо умови в хмарі такі, що для утворення опадів не вистачає тільки кристалізації, то введення кристалізуючих реагентів призводить до випадання опадів. В області додатних температур до укрупнення крапель призводить введення гігроскопічних речовин і ПАР.

Для розрахунків термодинамічних параметрів хмари доцільно використовувати струменеву модель хмарної конвекції, в основі якої лежить теорія вільних струменів. Струмінь – це один з прикладів руху тіл змінної маси, при розгляді яких потрібно використання другого закону руху Ньютона і закону збереження тепловмісту з урахуванням зміни маси тіла, яке рухається.

Починаючи з 50-тих років ХХ ст. розробляються *метеотрони*, які є системою камер згорання з регульованим режимом роботи та призначаються для викликання (або інтенсифікації) опадів, а також можуть використовуватися як засіб викиду на максимальну висоту токсичних продуктів виробництва в аварійних ситуаціях. Потужність метеотронів досягає  $10^3$  МВт, висота підйому струменя метеотрону  $10^2 - 10^3$  м і більше. За сприятливими метеоумовами над метеотроном виникає штучна купчаста хмара, що має всі основні ознаки купчасто-дощової. Про потужність

метеотрону можна судити по енергії секундної маси струменя на нижньому рівні, який складається з теплової та кінетичної енергії

$$P_0 = \pi R_0^2 \rho_0 w_0 \left( \Delta T_0 c'_p + \frac{w_0^2}{2} \right), \quad (2.5)$$

де  $c'_p$  – теплоємність повітря при постійному тиску;  $w_0$  – вертикальна швидкість струменю;  $\Delta T_0$  – перегрів по відношенню до навколишнього повітря.

Сприятиме очищенню від домішок повітряних басейнів буде приведений в дію струмінь, який викидає вгору повітря. До локальних повітряних басейнів, для очищення яких використовуються струмені, відносяться промислові кар'єри. На рисунку 2.5 приклад очищення за допомогою метеотрону відкритого промислового кар'єру.

Висхідний струмінь втягує в себе в придонному шарі кар'єру забруднене повітря, а додатково домішки залучаються до струменю на всьому його шляху в кар'єрі. На зміну забрудненому повітрю в кар'єр надходить повітря з навколишнього середовища, формуючи компенсуючий низхідний потік.

Температурна інверсія в кар'єрі, яка характерна для сильних забруднень, при цьому руйнується, дифузійне перенесення домішок вгору посилюється. Очищенню кар'єру сприяють обидва чинники - винесення домішок струменем і посилення дифузійного перенесення домішок зовні струменю.

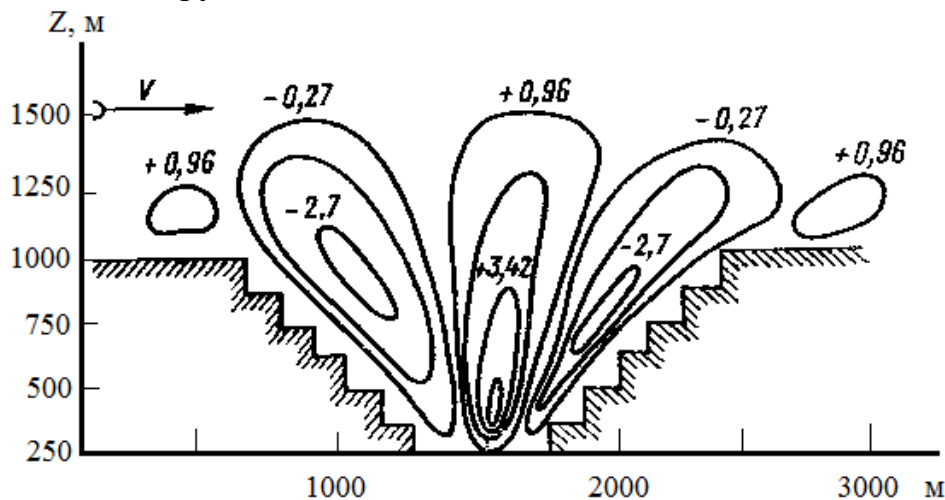


Рисунок 2.5 – Метеотрон – пристрій, який вентилює повітря в кар'єрі: ізолінії висхідних потоків (+), низхідних потоків (-), за одиницю взято вітер поза кар'єром

Теплі хмари і тумани є аеродисперсною колоїдною стійкою системою. В них відсутня потенційна нестійкість переохолоджених аерозолів. Для порушення стійкості в хмару або туман вводять

гігроскопічний реагент, частинки якого можуть швидко зростати і коагулювати з дрібнішими краплями.

Як «ініціаторів» кристалізації використовують частинки (вуглекислоти), додаткове ускладнення дає електризація поверхні реагентів і частинок, які утворюються. Основний реагент – тверда вуглекислота, температура випаровування якої  $-78,0^{\circ}\text{C}$ . Вуглекислий газ в чистому вигляді зріджують і заморожують в брикети по 40 кг, які кладуть в спеціальні термо- та гідростійкі контейнери. Засів хмар відбувається з борту літака за допомогою автоматичного дозаторного генератора, який подрібнює брилу замороженого вуглекислого газу до потрібної консистенції і отриманим льодяним пилом засіває необхідну частину хмари. Генерація частинок відбувається безперервно. Льодяні частинки, потрапляючи в повітряний струмінь за літаком, розповсюджуються в напрямі, перпендикулярному до осі струменя, й їхня концентрація збуває монотонно, як уздовж, так і уперек струменю. Широко використовується пропан – температура кипіння  $-42,0^{\circ}\text{C}$ . Холодореагенти застосовуються при розсіюванні низької хмарності або туману, а також для викликання додаткової кількості опадів в посушливих районах.

Реагенти можуть вводитися в хмари таким чином:

- 1) шляхом безперервно регульованого випуску з відповідних пристроїв (генераторів), встановлених на борту літака або на землі;
- 2) за допомогою ракет або трасуючих або вибухаючих снарядів;
- 3) повітряним струменем, направленим вертикально вгору.

Якщо диспергування реагенту проводиться методом вибуху, то реагент розповсюджується в хмарі внаслідок турбулентної дифузії, і для розрахунку розповсюдження частинок реагенту використовуються формули миттєвого точкового джерела. Вважаємо дифузю ізотропною, а коефіцієнт дифузії – постійним, у такому разі ізолінії концентрацій є сферами з центром в точці вибуху. Якщо реагент масою  $Q$  диспергує вибухом, то, відповідно до формул ізотропного джерела, він розповсюджується згідно із законом

$$\frac{c}{Q} = [4\pi D\tau]^{-3/2} e^{-\frac{r^2}{4D\tau}}, \quad (2.6)$$

де  $c$  – об'ємна концентрація реагенту на відстані  $r$  від точки вибуху з часом. На фіксованій відстані  $r$  від вибуху величина  $\frac{c}{Q}$  як функція часу має максимум. Його можна визначити за умови

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{c}{Q} \right) = 0 \text{ при } \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \left( \frac{c}{Q} \right) < 0 \quad . \quad (2.7)$$

Диференціюємо (7) по  $\phi$

$$r^2 |C=C_{max} = R^2 = 6D\phi^*, \quad (2.8)$$

що визначає час  $\tau^*$  настання *max* концентрації при заданій відстані до точки вибуху. Максимальна концентрація може бути отримана, якщо  $\tau = \tau^*$ , тоді

$$\left( \frac{c}{Q} \right)_{\max} = \frac{1}{\left( \frac{2}{3} \pi e \right)^{3/2} R^3}. \quad (2.9)$$

Чим більша відстань від точки вибуху, тим менша максимальна концентрація і тим пізніше вона досягається на даній відстані. Рівняння показують, якщо  $R > 0$ , то  $\frac{c}{Q} \rightarrow \infty$ .

Більш точно активність реагентів вимірюється за допомогою РЛС з поляризованим сигналом. За ступенем деполаризації відображеного від хмари сигналу можна судити про концентрацію виниклих кристалів на різних відстанях від місця введення. Ознака вдало вибраної концентрації реагенту – поява в хмарі провалів після засіву.

#### ЛІТЕРАТУРА

[1], с. 9-42; [2], с. 9-37.

#### ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які види холодореагентів існують?
2. Як відбувається трансформація спектру хмарних крапель при внесенні реагентів?
3. Визначте основні властивості вільних турбулентних струменів?
4. Що таке турбулентні струмені у атмосфері?
5. Які три ділянки існують в атмосферних струменях?
6. Дайте характеристику сонячному метеотрону.
7. За допомогою якого пристрою можуть бути створені типові струмені?
8. Чому після досягнення струменем рівня конденсації збільшується перегрів і швидкість струменя?

9. При яких умовах може бути отримане приблизне рівняння що до активної ділянки струменя?
10. Дайте визначення вертикально спрямованої секундної маси.
11. Чим визначаються зміни тепловмісту вертикально спрямованої секундної маси?
12. Методи утворення східних імпульсів.
13. Яке співвідношення характеризує кут розчину вісесіметричного струменя?
14. Закономірності розповсюдження реагентів під час впливу на хмари та тумани.
15. Схема очищення кар'єрів.
16. Методи вводу реагентів у хмари.
17. Метод руйнування купчастих хмар, які розвиваються.

#### 2.2.4 Повчання по вивченню блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси», лекційний модуль № 2: **«Управління процесами хмаро та опадоутворення. Розсіювання туманів. Вплив на електричні процеси в хмарах.»**

У результаті засвоєння змістовного лекційного модуля студенти повинні знати:

- технічні засоби активного впливу;
- засоби активної і пасивної локації для спостереження за хмарними системами;
- показники оперативної оцінки фізичної ефективності і управління активним впливом;
- процеси, які відбувається в хмарі після введення кристалізуючого реагенту.

У світі існує необхідність в захисті більш ніж 150 мільйонів гектарів сільськогосподарських посівів, які пошкоджуються градом. Понад 30 країн світу ведуть боротьбу з цим явищем різними методами (ракетним, артилерійським, авіаційним, а також за допомогою наземних генераторів). В цей час основними засобами доставки реагентів в хмари є некеровані ракети (клас «земля – повітря»), які стартують з землі, та зенітні артилерійські снаряди (рис. 6), але разом з цим застосовується скидання реагентів в хмари з літаків або обстріл хмар за допомогою літакових ракетних установок (ракети класу «повітря – повітря»). Іноді для введення реагентів в хмару із землі використовуються висхідні потоки природні, або створені штучно.

*Для спостереження за хмарними системами застосовуються засоби активної та пасивної локації:*



1. Активні радіолокатори сантиметрового діапазону довжин хвиль, які дозволяють визначати радіолокаційну відбиваність хмар і опадів, доплерівський зсув частоти радіолуни, спричинений впорядкованими і нерегульованими турбулентними рухами частинок, поляризаційні характеристики сигналу, пов'язані з формою і фазовим станом гідрометеорів.

2. Засоби пасивної радіолокації з використанням сигналів теплового (рівноважного) і нетеплового (нерівноважного) випромінювання. У першому варіанті використовуються пасивні радіолокатори (радіометри) на фіксованій частоті (практично у вузькому діапазоні частот). В другому варіанті необхідно вимірювати спектр випромінювання об'єкта в порівняно широкому діапазоні.



Рисунок 2.6 – Направляючі комплексу пускової установки

3. Засоби активно-пасивної радіолокації грозонебезпечних і грозових зон в хмарах.

4. Лідари, призначені, як і радари, для визначення луни від хмар, яка містить в собі інформацію про межі та густину хмар, про форму і фазовий стан гідрометеорів.

5. Акустичні та радіоакустичні локатори призначені для визначення структури термобаричного і вітрового поля атмосфери, які формують хмари і тумани.

6. Супутникова апаратура пасивної оптичної і радіотеплолокації (зондування) використовується для визначення радіаційної та радіояскравості температури підстильної поверхні при

різних поляризаціях сигналів, що дозволяє отримати інформацію про великомасштабні синоптичні процеси, про структуру вихрових хмарних і нехмарних утворень, про посушливі або перезволожені зони, про межі між водою і льодом в морях і т.п.

7. Супутникова апаратура активної радіолокації, що дозволяє одержувати великомасштабну і одночасно з високим просторовим розділенням детальну структуру атмосферних вихорів, хмар, опадів, льодяних полів в морях і т.п.

8. Супутникова апаратура активної оптичної локації призначається для аналогічних цілей у видимому та ІК-діапазонах.

*Практичний інтерес представляє управління розвитком неконвективних хмар у важливих для народного господарства випадках:*

- викликання опадів з хмар, які в своєму природному розвитку не досягли дощової стадії, з метою зволоження ґрунту, створення додаткового снігозапасу або запобігання розповсюдження лісової пожежі;

- інтенсифікація слабких і помірних опадів з метою збільшення водозбору окремих басейнів;

- інтенсифікація процесу утворення опадів з фронтальних хмар на підступах до міста з метою ослаблення або повного їх припинення над самим містом;

- розсіяння низької хмарності з метою виконання посадки або зльоту літаків, а також прямого візуального перегляду з висоти наземних або, навпаки, з землі висотних цілей, наприклад, при астрономічних спостереженнях і т.д.

Управління неконвективними хмарами здійснюється за допомогою реагентів, що змінюють хід внутрішньохмарних процесів. Як і при аналізі умов природного опадоутворення, слід розрізнити хмари, які мають або не мають переохолоджену частину. Радикальним засобом інтенсифікації опадоутворення з переохолоджених хмар є штучна кристалізація.

*Розглянемо можливості штучного перетворення конвективної хмари в купчасто-дощову, яка природним шляхом не дійшла до дощової стадії.* Перш за все, це можливість інтенсифікації конвекції з метою збільшення вертикальної потужності хмари. Важливим чинником є стратифікація атмосфери. Проте безпосередньо впливом змінити розподіл температури, вологи, вітру в атмосфері в масштабах, порівнянних з розмірами Сб, ми не в змозі. Збільшення горизонтальних розмірів хмари і зменшення залучення сприяли б розвитку конвекції. Горизонтальне переміщення хмар з метою зведення декількох хмар воедино різко збільшило б можливості їх вертикального розвитку, але цього ми робити не вміємо. Отже, залишилася лише одна величина – температура хмари  $T'(z)$ ,

управління якою в переохолоджених хмарах, за допомогою кристалізуючих реагентів цілком реально.

Розрізняють два випадки:

- перший, коли над хмарою атмосфера стійка по відношенню до конденсаційного процесу, але нестійка по відношенню до сублімації. Тоді кристалізація допомагає подолати бар'єр, існуючий між ними;

- другий, коли хмара в своєму природному розвитку досягла рівня стійкості по відношенню до конденсаційних процесів (безпосередньо над хмарою знаходиться вологостійка стратифікація), але дещо вище є достатньо могутній шар з сильною нестійкістю. Тоді штучна кристалізація, якщо тільки вона допоможе хмарі пробити шар стійкості, викличе бурхливу конвекцію в нестійкому шарі.

Крім посилення конвекції безпосередньо за рахунок виділення теплоти кристалізації, існують вторинні ефекти, супутні кристалізації хмари, які впливають на динаміку її розвитку: розширення хмари в горизонтальному напрямі і посилення конденсаційно - коагуляційних процесів зростання крапель в хмарі.

При введенні реагенту льодяні частинки укрупнюються в хмарі енергійніше, ніж краплі, в цьому випадку опади досягають поверхні землі. Чим потужніша хмара і чим ближча температура її верхньої частини до температури природної кристалізації, тим вірогідніше виявлялося штучне перетворення її в дощову. Штучна кристалізація може викликати два процеси: посилення конвекції і посилення процесу укрупнення частинок хмар.

*Якщо хмара знаходиться у градовому стані можна визначити основні принципово можливі варіанти запобігання випадання граду з хмари.*

1) Найнерентабельніший варіант, але найнадійніший – штучна кристалізація всієї частини переохолодженої хмари (величезна витрата реагенту). Інші, безреагентові способи кристалізації, поки не застосовуються.

2) Повне або часткове руйнування хмари в передградовій стадії, зокрема, вимивання з нього вологи шляхом викликання штучних опадів.

3) Штучна кристалізація частини переохолодженої хмари нижче рівня утворення небезпечних градових зародків, тобто штучне зменшення краплинно - рідкої водності хмари призведе до зменшення числа градин, здатних досягти поверхні землі.

4) Штучна кристалізація переохолодженої частини хмари вище рівня утворення небезпечних градових зародків, тобто штучний зсув вниз зони інтенсивної кристалізації призведе до збільшення числа частинок, які несуться в ковадло, відповідно зменшується число небезпечних частинок.

5) Штучне створення додаткових градових зародків, здатних

конкурувати в боротьбі за переохолоджену вологу з природними зародками.

б) Управління спектром переохолоджених крапель в зоні утворення небезпечних градових зародків (методи дроблення великокрапельного «шлейфу», штучна пере конденсація, зменшення поверхневого натягнення крапель та ін.).

Під час впливу одночасно в тій чи іншій мірі відбувається безліч змін – кожний з перерахованих варіантів для певної частини зародків. Причому їх відносна роль може мінятися відповідно до конкретних властивостей хмари і тактики впливу (кількість реагенту, рівень його введення, темп і т.п.).

*Розглянемо розсіяння туманів за допомогою штучних теплових джерел.* Спосіб прогрівання ЗПС з метою розсіяння туману відомий давно. Система ФІДО – служба штучного розсіяння туману спалювала паливо в пальниках, розташованих уздовж ЗПС для забезпечення зльоту і посадки літаків. При розрахунку прояснення туману за допомогою теплових джерел необхідно знати:

- 1) як розповсюджується тепло в тумані;
- 2) до якої зміни структури туману, отже, і видимості в ньому, призведе вплив.

Розрахунки показують, що для істотного поліпшення видимості потрібний порівняно невеликий нагрів. В тумані, що рівномірно прогрівається, видимість збільшується нерівномірно – спочатку швидкість її невелика, потім вона стрімко зростає. Ефект тим більший, чим більша водність туману. Основний ефект в розсіянні туману належить конденсаційним процесам, а коагуляційним – другорядний, оскільки водність і розміри крапель в тумані малі. В більш густих аерозолях (в розвинених хмарах) роль коагуляції зростає.

*Розсіяння туманів за допомогою зміни їх властивостей поглинати.* Змінюючи властивості хмар і туманів поглинати при опромінюванні їх природною або штучною радіацією, можна змінити тепловий баланс хмар або туманів. Введення диспергованих частинок домішок з великим коефіцієнтом поглинання робить визначальним вплив на зміну плавучості повітря, швидкості випаровування крапель або на характер їх зростання.

*Розсіяння туманів за допомогою реагентів, що інтенсифікують конденсаційні процеси.*

Один з найуспішніших способів – введення кристалічного реагенту в переохолоджену хмару. В цьому випадку порушується колоїдна стійкість туману, що складається з 3-х фаз. Відбувається перегонка водяної пари з крапель на кристали. При вдало підібраній концентрації реагенту туман стає оптично більш прозорим – видимість поліпшується.

Аналогічний процес може відбуватися при введенні в туман крапель розчинів концентрованих солей. Треба враховувати, що по мірі зростання «солоних крапель» ефект зменшується.

Вживання ПАР більш перспективне. Зберігаючись біля поверхні крапель, які зростають, ПАР сприяють збереженню дефіциту вологості по відношенню до крапель туману, що не містять ПАР.

*Акустичні методи розсіяння туманів.* Проходження акустичних сигналів через туман викликає в ньому такі ефекти. Частинки туману захоплюються звуковою хвилею тим більше, чим більше їх розміри (при фіксованій частоті). В результаті цього в полідисперсному тумані з'являються додаткові зсуви частинок туману відносно один одного, це збільшує ймовірність їх зіткнення і подальшої коагуляції.

Відставання частинок туману від періодичного зсуву повітряного потоку, викликаного звуком (різне для частинок різних розмірів), створює складну картину взаємного обтікання частинок, в якій спостерігаються різного роду гідродинамічні ефекти. Деякі з цих ефектів також сприяють укрупненню частинок туману. Нарешті, попадання частинок туману в області то підвищеного, то зниженого тиску періодично зміщує конденсаційну рівновагу системи «крапля – водяна пара» в основному за рахунок зміни температури туману, викликаного зміною тиску. Сумарний ефект при вдалому підборі акустичних параметрів може виявитися таким, що за короткий термін в «озвученому тумані» сумарний поперечний перетин частинок туману зменшиться, а видимість відповідно збільшиться.

*Розглянемо можливості прояснення туманів з використанням електричних сил:* за допомогою дискретно розподілених в тумані заряджених колекторів, а також шляхом створення в тумані достатньо могутніх електричних полів.

Звичайно частинки туманів заряджені і тому мають складову руху, обумовлену дією на них електричного поля. З метою інтенсифікації процесу руху частинки туманів можна заряджати штучно. Незаряджені частинки можуть рухатися під дією електричних полів, якщо електричні сили викликають поляризацію частинок, а градієнт напруженості електричного поля відрізняється від нуля.

Щоб посилити процес руху частинок туману, частинки заряджають штучно. Для цієї мети застосовується *колектор* – це частина електричного двигуна, яка необхідна для відведення і підведення електричного струму і складається з ізольованих пластин на циліндрі, сполучених з секціями обмотки. Сітка з зарядженими колекторами, поставлена на шляху адвективного туману, може взяти на себе значну частину туману. Для цього сітка повинна бути ажурною і на неї треба подати дуже високий потенціал, близький до пробійного, а самі краплі повинні мати великий заряд.

*Оптичні квантові генератори (ОКГ)* дозволяють формувати монохроматичний пучок електромагнітної енергії в спектральній області, в якій ослаблення енергії при проходженні атмосфери відносно мале, а поглинання частинками туману, навпаки, велике. В цьому випадку нагрівається не повітря, а безпосередньо частинки туману, що оптимізує процес теплового прояснення туманів.

*Регулювання випаровування з метою боротьби з туманами.* Покриття водяного дзеркала плівкою ПАР з метою зменшення випаровування застосовується для збереження води в ставках, озерах, штучних гідротехнічних спорудах. Успішними виявилися спроби перешкодити за допомогою ПАР виникненню могутніх туманів випаровування в річкових і морських портах

*Розряди грозової хмари на землю, які штучно викликаються за допомогою ракет.* Штучний розряд хмари – явище досить часте. У напрямку до грозової хмари вистрілювалася ракета типа „Земля–повітря”, яка тягнула за собою сталевий дріт, що змотувався з котушки, встановленої на борту корабля. Кінець дроту через іскровий проміжок заземлявся на морі. Характерно, що з верхнього кінця каналу у напрямку до хмари спрямовуються блискавичні гілки, які світяться. Заряд, що стікає на землю, в подібних дослідах може досягати кількох десятків кулонів, що по порядку величини порівнянний із загальним електричним зарядом грозової хмари.

*Можливість управління гроzoneбезпечними хмарами за допомогою зміни кристалізаційних потенціалів хмарної води.* Електризація хмар, які бурхливо розвиваються, різко посилюється після того, як в їх верхній частині починається інтенсивна кристалізація. Льодяні краплі, падаючи вниз, стикаються з переохолодженими краплями, які у свою чергу починають кристалізуватися. Якщо кристалізація розповсюджується по поверхні краплі достатньо швидко, то під впливом деформації відбувається енергійне вибухоподібне розколювання на частини краплі, яка кристалізується. При кристалізації границя розділу вода - лід набуває вентильних властивостей. Тому фронт кристалізації, який рухається, розділяє електричні заряди різних знаків, а вибух відносить їх один від одного разом з осколками льоду і бризками води.

Найбільш інтенсивно процес розділення зарядів йде при зіткненні переохолоджених крапель з градинами. Якщо у воді були розчинені кислоти і луги, то інтенсивність розділення зарядів фронтом кристалізації за умов, близьких до максимуму цього явища, виявляється практично однозначно залежною від величини водневого показника рН і від швидкості руху фронту. За наявності у воді солей хід процесу виявляється залежним від їх концентрації.

*Засів хмар кристалізуючими реагентами з метою зміни їх електричного стану.* Для впливу використовувалися протиградові

ракети „земля–повітря” типу «Алазань», для спостереження – активні і пасивні радіолокатори, а також наземні грозопеленгатори і вимірники напруженості електричного поля. Обстріл хмари проводився виробами «Алазань» трьома серіями (12, 6, 12 ракет). Всього в хмару ввели близько 15 г реагенту, що дозволило за короткий час створити концентрацію активних ядер кристалізації, близької до  $10^5 \text{ м}^{-3}$ . В районі полігону протягом 15 хвилин практично припинилася грозова діяльність. Вплив сприяв перебудові електричної структури хмари.

#### ЛІТЕРАТУРА

[1], с. 42-108; [2], с. 42-87.

#### ПИТАННЯ ДО САМОПЕРЕВІРКИ

1. Які існують технічні засоби активного впливу?
2. Які засоби активної і пасивної локації застосовуються для спостереження за хмарними системами?
3. Які показники пропонується використовувати для оперативної оцінки фізичної ефективності і управління активним впливом?
4. Як визначається зміна тенденції в розвитку підданих впливу хмар по часовому ходу радіолокаційних параметрів?
5. Які шляхи управління розвитком неконвективних хмар використовуються у важливих для народного господарства випадках?
6. Якщо хмара представляється фільтром, то які градові зародки вона має?
7. Визначить основні принципово можливі варіанти запобігання випадання граду з хмари.
8. Що відбувається в хмарі після введення кристалізуючого реагенту?
9. Що необхідно знати при розрахунку прояснення туману за допомогою теплових джерел?
10. Три способи, які призводять до посилення конденсаційного укрупнення частинок.
11. Чому при проходженні акустичних сигналів в полідисперсному тумані з'являються додаткові зсуви частинок туману відносно один одного?
12. Для чого застосовується колектор?
13. Типові моделі, які ілюструють принципові можливості електричного управління туманами.
14. Оптичні квантові генератори як засіб для прояснення туманів.
15. Чому ПАР застосовується для збереження води в ставках, озерах, штучних гідротехнічних спорудах?
16. Як, управляючи конденсаційними властивостями і кількістю ядер конденсації, можна змістити момент початку утворення густого туману або змінити видимість в ньому?

17. Можливості створення іонізованих каналів в атмосфері за допомогою лазерів.

18. Можливості впливу на хмари сильноточними пучками релятивістських електронів і протонів.

19. Можливість управління гроzoneбезпечними хмарами за допомогою зміни кристалізаційних потенціалів хмарної води.

20. Засів хмар кристалізуючими реагентами з метою зміни їх електричного стану.

### 2.3 Повчання по вивченню практичної частини курсу

Наведені нижче практичні змістовні модулі повинні бути виконані студентами під час аудиторних занять. Оцінювання результатів виконання практичних змістовних модулів проводиться за такими критеріями: практичний змістовний модуль (у % від кількості балів, виділених на неї, із заокругленням до цілого числа). Максимальна кількість балів, яку може одержати студент при виконанні програми практичних занять становить:

- блок змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» – 25 балів;
- блок змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» – 25 балів.

0%	завдання невиконане;
1-59%	завдання виконане частково та містить суттєві помилки методичного або розрахункового характеру;
60-73%	завдання виконане повністю, але містить суттєві помилки у розрахунках або у методиці;
74-89%	завдання виконане повністю і вчасно, проте окремі несуттєві недоліки (розмірності, висновки, оформлення);
90-100%	Завдання виконане правильно, вчасно і без зауважень.

#### 2.3.1 Повчання по виконанню практичного змістовного модулю блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»

##### *Завдання №1*

**ТЕМА: Зростання часток у переохолоджених шаруватоподібних хмарах.**

*Короткі теоретичні відомості.*

В задачі розглядаються механізми перетворення хмарних часток в частки опадів та їх залежність від параметрів хмари. Для типового розподілу температури і вологості виконуються розрахунки зростання



крапель та льодових часток під час падіння крізь хмару. Зростання крапель у хмарі визначається двома механізмами – конденсацією (сублімацією) та коагуляцією:

$$\frac{dr}{d\tau} = \left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{конд}} + \left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{коаг}} \quad (2.10)$$

*Конденсаційне зростання крапель:*

$$\text{де} \quad \left(\frac{dr}{d\tau}\right)_{\text{конд}} = \frac{D \rho_{\text{вх}} \mu E_{\text{в}}}{r_{\text{в}} \rho_{\text{в}} M p} (f - 1) \frac{\phi(\text{Re})}{1 + \chi_{\text{в}}}, \quad (2.11)$$

$$\phi(\text{Re}) = 1 + 0,24\sqrt{\text{Re}}, \quad (2.12)$$

$$\chi_{\text{в}} = \frac{D \mu^2 L^2 \rho_{\text{вх}} E_{\text{в}}}{k N_A M T^2 \lambda p}, \quad (2.13)$$

$r_{\text{в}}$  – радіус краплі;  $\tau$  – час;  $D$  – коефіцієнт молекулярної дифузії пари;  $\rho_{\text{в}}$ ,  $\rho_{\text{вх}}$ ,  $\mu$ ,  $M$  – густина і молярні маси води та повітря відповідно;  $E_{\text{в}}$  – тиск насиченої водяної пари над водою;  $p$  – атмосферний тиск;  $f$  – відносна вологість у хмарі;  $k$  – стала Больцмана;  $N_A$  – число Авогадро;  $\phi(\text{Re})$  – безрозмірний коефіцієнт вентиляції;  $\text{Re}$  – число Рейнольда:

$$\text{Re} = \frac{2r_{\text{в}}V(r_{\text{в}})}{\nu}, \quad (2.14)$$

$V(r_{\text{в}})$  – швидкість падіння краплі у повітрі;  $\lambda, \nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості та коефіцієнт теплопровідності повітря.

Швидкість падіння  $V(r_{\text{в}})$  може бути розрахована:

$$V(r_{\text{в}}) = 9,6(1 - \exp(-1200r_{\text{в}}))(1 - \exp(-12000r_{\text{в}}))\phi(z), \quad (2.15)$$

Множник  $\phi(z)$  враховує зміни швидкості падіння крапель з висоти, пов'язані зі змінами густини повітря:

$$\phi(z) = \sqrt{\rho_{\text{вх.н}} \rho_{\text{вх}}(z)}, \quad (2.16)$$

$\rho$  – густина повітря при нормальних умовах ( $p=1013,6 \text{ гПа}$ ,  $T=293 \text{ К}$ ).

Коагуляційне зростання крапель:

$$\left(\frac{dr_g}{d\tau}\right)_{\text{коаг}} = \frac{(r_g, r')V(r_g)q}{4\rho_g}, \quad (2.17)$$

де  $q$  – водність хмари,  $E(r_g, r')$  - коефіцієнт захоплення краплею радіуса  $r$  крапель радіусом  $r'$  (при  $r' < r_g$ ). Рівняння до зростання крапель:

$$d\tau = \frac{dz}{\omega - V(r_g)}, \quad (2.18)$$

Для шаруватоподібних хмар значенням  $\omega$  можна знехтувати порівнюючи зі  $V(r_g)$ , при цьому для краплі, яка падає,  $dz < 0$ . Водність хмар:

$$\bar{q} = q_0 + B(\bar{T} - 273), \quad (2.19)$$

де  $q_0 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ кг} / \text{м}^3$  – середня водність хмари при  $t \approx 0^\circ \text{C}$ ;  
 $B = 0,75 \cdot 10^{-5} \text{ кг} / (\text{м}^3 \cdot \text{K})$  – коефіцієнт пропорціональності.

#### Порядок виконання роботи:

1. Від заданих у таблиці 2.1 варіантів перейдіть до середніх для хмари значень  $\bar{q}$ ,  $\bar{T}$ ,  $\bar{E}_g$ ,  $\bar{\rho}_{вх}$ ,  $\bar{p}$ .
2. Побудуйте залежності швидкості падіння крапель води  $V(r_g)$  від їх розмірів  $r_g$ .
3. Для заданого у вашому варіанті значення  $r'$  побудуйте залежність коефіцієнта захоплення від  $r$ .
4. У всіх варіантах  $Z_{н.г.} = 500 \text{ м}$ ,  $p_{н.г.} = 950 \text{ гПа}$ , в підхмарному шарі  $\gamma = 0,005 \text{ К/м}$ .

Таблиця 2.1 – Варіанти вихідних даних

№	$r'$ мкм	$f$	$T_{н.г.}, \text{K}$	$T_{г.г.}, \text{K}$	$H, \text{м}$	$\alpha$	$f_{н.г.}$
1	4	1,001	273	268	700	0,05	0,9
2	6	1001	268	263	800	0,05	0,9
3	8	1,001	263	259	600	0,05	0,9
4	4	1,002	273	267	700	0,05	0,9
5	5	1,002	270	265	800	0,05	0,9
6	6	1,002	268	262	600	0,025	0,8
7	7	1,002	265	258	800	0,025	0,8
8	8	1,002	260	256	600	0,025	0,8
9	9	1,001	273	265	700	0,025	0,8
10	10	1,001	278	268	800	0,025	0,8

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт захоплення  $E$  для крапель радіусом  $r_e$ , які падають скрізь хмару крапель радіусом  $r'$

$r_e$ , мкм	$r'$ , мкм					
	2	3	4	6	8	10
15	0,002	0,003	0,004	0,006	0,010	0,012
20	0,002	0,002	0,0004	0,007	0,015	0,023
25	0,005	0,01	0,01	0,01	0,026	0,054
30	0,01	0,01	0,01	0,016	0,058	0,17
40	0,01	0,01	0,03	0,19	0,35	0,45
60	0,01	0,02	0,05	0,22	0,42	0,56
80	0,02	0,06	0,18	0,35	0,50	0,62

**Звітність:** Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.

### Завдання №2

#### ТЕМА: Зростання крапель та граду в могутніх конвективних хмарах.

*Короткі теоретичні відомості.*

Утворення граду в могутніх купчастих хмарах відбувається при замерзанні невеликої кількості крупних крапель у середньої частині хмари. В задачі треба дослідити закономірності зростання крапель та граду. Зміну розмірів градин за часом можна розрахувати при розв'язанні рівняння:

$$\frac{da}{d\tau} = \frac{\mathcal{E}qv(a)}{4\rho_L}, \quad (2.20)$$

де  $a$  – радіус градини,  $\rho_L$  – густина льоду,  $q$  – абсолютна водність хмари,  $v(a)$  – швидкість падіння градини відносно нерухомого повітря,  $\mathcal{E}$  – коефіцієнт захоплення.

Зміна положення частинки у хмарі з висотою визначається відношенням:

$$dz = (w - v(a))d\tau \quad (2.21)$$

де  $w$  – вертикальна швидкість у хмарі.

$$w = w_0 + \alpha z^2(h - z), \quad (2.22)$$

де  $z$  – висота від нижньої межі хмари.

Швидкість падіння граду відносно нерухомого оточуючого повітря при  ${}^{\circ}T = 293K$ ,  ${}^{\circ}p = 1000zPa$  розраховується:

$${}^{\circ}v_L(a) = 200\sqrt{a_L} \quad (2.23)$$

$$v(a) = {}^{\circ}v(a)\phi(z) \quad (2.24)$$

$$\phi(z) = \left[ \frac{{}^{\circ}\rho_{ex}}{\rho_{ex.k}} \exp\left(\frac{\gamma_A - \gamma}{T} z\right) \right]^{1/2} \quad (2.25)$$

Водність хмари визначається:

$$q = b\rho_{ex}z^{1/2} \exp\left[-\left(\frac{z - h_0}{h_{i.k} - h_0}\right)^{\varepsilon}\right] \quad (2.26)$$

де  $h_0$  – висота нульової ізотерми у хмарі,  $h_{i.k}$  – висота рівня інтенсивної кристалізації,  $b$ ,  $\varepsilon$  – параметри хмари.

Для коефіцієнта захоплення:

$$\mathcal{E}_L = \begin{cases} 1 & \text{при } w > v_L(a), \\ \left(\frac{z - h_0}{h - h_0}\right)^{1/2} & \text{при } w < v_L(a). \end{cases} \quad (2.27)$$

Таблиця 2.3 – Варіанти вихідних даних

№	$a_{00}$ , МКМ	$w_0$ М/с	$\alpha$ , $m^{-2} \cdot c^{-1}$	$b$ , $m^{-1/2}$	$h_{i.k}$ , М	$h$ , М
1	40	2	0,20	1,0	6000	8000
2	40	3	0,15	1,2	7000	9000
3	40	4	0,10	1,4	7500	10000
4	40	5	0,25	1,2	6000	8000
5	40	3	0,20	1,6	7500	9000
6	50	4	0,15	1,5	7500	10000
7	50	5	0,25	1,5	6000	8000
8	50	2	0,20	1,5	7000	9000
9	50	3	0,15	1,3	8000	10000
10	50	4	0,20	1,2	7500	9000

### Порядок виконання роботи:

1. побудувати графіки зв'язку:  $w = w(z)$ ,  $q = q(z)$ ,  $v_L = v(a_L)$ ,  $\phi = \phi(z)$ ,  $\mathcal{E}_L = \mathcal{E}(z)$ ;
2. розрахувати зростання у хмарі граду за даними, для всіх варіантів:  $h_0 = 2000\text{м}$ ,  $\varepsilon = 2$ ,  $p_K = 850\text{Па}$ ,  $T = 287\text{К}$ ,  $\beta = 0,1$ .

**Звітність:** Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.

- 2.3.2 Повчання по виконанню практичного змістовного модулю блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»

### Завдання № 1

#### ТЕМА: Розповсюдження реагентів у хмарах.

##### *Короткі теоретичні відомості.*

Вплив з метою розсіяння туманів або хмарності, викликання опадів, запобігання градобою відбувається шляхом внесення в хмари і тумані реагентів, які сприяють утворенню льодяних часток. Введення реагенту в шаруваті хмари відбувається з літака під час його руху по маршруту. В могутні конвективні хмари реагент вводиться за допомогою ракет типу «земля-повітря» або піропатронів.

Коли використовуються ракети, реагент викидається по трасі польоту. За допомогою снарядів реагент вводиться локально – на деякій висоті снаряд вибухає. При впливі на переохоложені тумани введення реагентів відбувається за допомогою генераторів, які встановлені на невеликій висоті з навітряної сторони.

В задачі пропонується розрахувати процес розповсюдження реагентів при різних способах їх внесення, визначити розмір зони кристалізації та її зміни в часі. В основі методики розрахунків лежить рішення загальної задачі про дифузію пасивних домішок при різних початкових і граничних умовах.

##### *1. Дифузія домішки від миттєвого лінійного джерела.*

Цей випадок використовується при засіві з літака або за допомогою ракет. Концентрація льодяних частинок в конусоподібній зоні за літаком або ракетною розраховується за формулою:

$$C(r, \tau) = \frac{Q'}{4\pi D\tau} \exp\left[-\frac{r^2}{4D\tau}\right], \quad (2.28)$$

де  $Q'$  – число льодяних кристалів, які утворюються при внесенні реагенту на одиницю шляху по лінії засіву;  $D$  – коефіцієнт турбулентної дифузії;  $r$  – відстань від лінії засіву по перпендикуляру до неї;  $\tau$  – час.

Якщо  $\phi$  – витрата реагенту на одиницю шляху,  $N$  – льодоутворювальна активність реагенту (число льодяних кристалів, які утворюються на одиницю маси реагенту), то

$$Q' = \phi N. \quad (2.29)$$

Формула (2.28) отримана для ізотропної турбулентності.

### 2. Миттєве точкове джерело.

В задачі розглядається процес розповсюдження реагентів за допомогою снаряду, коли диспергування відбувається вибухом.

$$C(r, \tau) = \frac{Q}{(4\pi D\tau)^{3/2}} \exp\left[-\frac{r^2}{4D\tau}\right] \quad (2.30)$$

При цьому:

$$Q = mN, \quad (2.31)$$

$Q'$  – число льодяних кристалів, які утворюються при вибуху снаряду;  $m$  – маса реагенту в снаряді.

### 3. Безперервне точкове джерело.

Рішення використовується для розрахунків розповсюдження реагенту від наземного генератора. При цьому, розглядаються випадки, коли реагент переноситься вітровим потоком зі швидкістю  $u$ :

$$C(x, y, z) = \frac{Q'u}{4\pi\sqrt{D_y D_z x}} \exp\left[-\frac{y^2 u}{4D_y x}\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2 u}{4D_z x}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2 u}{4D_z x}\right] \right\}, \quad (2.32)$$

де  $Q'$  – число льодяних кристалів, які поступають від джерела в одиницю часу;  $h$  – висота розміщення джерела; вісь  $x$  – спрямована по потоку;  $y$  – перетинає його;  $z$  – висота.

### Порядок виконання роботи:

1. По формулі (2.28) розрахуйте поле концентрації реагенту в координатах  $(r, \tau)$ . Задайте фіксовані значення  $\tau = 500, 1000, 2000, 3600, 5400$  с.
2. Для кожного значення розрахуйте  $C(r, \tau)$  при різних значеннях  $r =$  (от 0 до такого значення, при яком  $C(r, \tau) \cong 10^0 \dots 10^1 \text{ м}^{-3}$ ).
3. На координатній сітці нанесіть розраховані значення  $C$ , проведіть ізолінії, кратні  $10^n$ .
4. Проаналізуйте отримане поле концентрації.

Таблиця 2.4 – Варіанти вихідних даних

№	$\varphi$ г/м	$N$ , г <sup>-1</sup>	$m$ , г	$\frac{dm}{d\tau}$ , г/с	$D_0$ , м <sup>2</sup> /с	$u$ , м/с	$h$ , м
1	0,1	$5 \times 10^{12}$	50	0,5	5	5	0
2	0,2	$5 \times 10^{12}$	100	0,4	5	5	0
3	0,3	$10^{12}$	150	0,3	5	5	5
4	0,4	$10^{12}$	200	0,2	5	3	5
5	0,5	$10^{12}$	250	0,1	5	3	5
6	0,1	$10^{13}$	50	0,5	10	5	10
7	0,2	$10^{13}$	100	0,4	10	3	20
8	0,3	$10^{13}$	150	0,2	10	3	20
9	0,4	$10^{13}$	200	0,3	10	3	20
10	0,5	$10^{13}$	250	0,1	10	3	20

**Звітність:** Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.

### Завдання №2

#### ТЕМА: Тепловий метод розсіяння туманів

##### *Короткі теоретичні відомості.*

В задачі розглядається можливість розсіяння туманів тепловим методом – підігрівом повітря. Добрі результати по розсіянню теплих туманів можуть бути отримані при підігріванні туману. Треба провести оцінку енергетичних затрат, необхідних для розсіяння туману над злітно-посадковою смугою. Мінімальна кількість тепла  $Q_{\text{мін}}$ , необхідного до повного випаровування туману в одиничному об'ємі

складається із затрат тепла на випаровування капель та на підігрів повітря на  $\Delta T_{\min} = T_1 - T_0$  від початкової температури  $T_0$  до температури  $T_1$ , при якій вся рідка крапельна волога може утримуватися у вигляді насиченої пари:

$$Q_{\min} = c_P \rho_{\text{нов}} \Delta T_{\min} + L q_0, \quad (2.33)$$

де  $c_P$  і  $\rho_{\text{нов}}$  – теплоємність та густина повітря,  $L$  – теплота фазового переходу вода - пара,  $q_0$  – водність туману.

Значення  $\Delta T_{\min}$  знаходиться з виразу:

$$\Delta T_{\min} = \frac{q_0}{\rho_{\text{нов}} \left[ \left( \frac{58}{T_0} \right)^2 \frac{E_0}{p} - c_P \frac{\alpha'}{\alpha} \right]} \quad (2.34)$$

де множник  $\left( \frac{58}{T_0} \right)^2$  вимірюється в  $K^{-1}$ .

Значення ідеального палива (електропідігрівачів)  $\alpha' = 0$ , значення  $\alpha'$  для реального палива наведені в таблиці 2.6. Коли розрахунки проводяться з урахуванням швидкості вітру  $u$ , туман треба випаровувати безперервно – за одиницю часу в об'ємі:

$$V = (b \cos \phi - l \sin \phi) h u, \quad (2.35)$$

де  $b, l, h$  – ширина, довжина і висота зони,  $\phi$  – кут між вектором швидкості та азимутом ВПС, коли вітер направлений вздовж ВПС, то  $\phi = 0$  або  $180^\circ$ .

У всіх варіантах:

$$b = 100 \text{ м}, \quad l = 2000 \text{ м}, \quad h = 50 \text{ м}, \quad p = 1000 \text{ гПа}.$$

### Порядок виконання роботи:

1. Розрахуйте за формулою (2.34)  $\Delta T_{\min}$  для реального та ідеального палива в діапазоні температур  $-20 \dots 10^\circ \text{ C}$  з інтервалом  $5^\circ \text{ C}$ .
2. Використовуючи отримані значення  $\Delta T_{\min}$ , за формулою (2.33) розрахуйте норму тепла при різних температурах туману.
3. Результат представте у вигляді графіків  $\Delta T_{\min} = \Delta T(T)$ ,  $Q_{\min} = Q(T)$ .

**Звітність:** Практичне завдання оформити відповідно до порядку виконання та здати викладачу.



Таблиця 2.5 – Варіанти вихідних даних

№	$q_0$ , г/м <sup>3</sup>	$T_\infty$ , К	$T_{00} - T_\infty$	$D$ , м <sup>2</sup> /с	$u$ , м/с	Паливо
1	0,1	273	10	0,5	2	Гас
2	0,2	273	15	0,5	2	Гас
3	0,3	273	20	1,0	2	Метан
4	0,4	273	25	1,0	2	Гас
5	0,1	273	30	0,5	2	Пропан
6	0,2	263	10	0,5	3	Пропан
7	0,3	263	15	1,0	3	Метан
8	0,4	263	20	1,0	3	Метан
9	0,1	263	10	0,5	3	Гас
10	0,2	263	15	0,5	3	Бензин

При температури  $T_0 = T_\infty$ , розрахуйте витрату палива на зону об'ємом  $V = blh$  при штилі та при вітрі.

Таблиця 2.6 – Теплотвірна  $\alpha'$  та вологотвірна здатність деяких видів палива

Паливо	$\alpha$ , МДж/кг	$\alpha'$ , кг/кг
Метан	55	2,25
Пропан	50	1,6
Спирт	31	1,2
Бензин	44	1,4
Керосин	40	1,4

### ЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Число Авогадро:  $N_A = 6,027 \cdot 10^{26}$  ккмоль<sup>-1</sup>;

Стала Больцмана:  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;

Універсальна газова стала:  $R^* = 8,314 \cdot 10^3$  Дж/(К·моль)

Молярна маса сухого повітря:  $M = 29$  кг/(К·моль);

Молярна маса водяної пари:  $\mu = 18$  кг/(К·моль);

Гradient авто конвекції:  $\gamma_A = 3,4 \cdot 10^{-2}$  К / м

Сухоадіабатичний gradient температури:  $\gamma_a = 0,976 \cdot 10^{-2}$  К/м;

Густина

повітря:  $\rho = 1,275$  кг/м<sup>3</sup>; при  $t = 0^0$  С;

води  $\rho_v = 1000$  кг/м<sup>3</sup>; при  $t = 0^0$  С;

льоду  $\rho_l = 917$  кг/м<sup>3</sup>; при  $t = 0^0$  С.

Залежність густини від температури та тиску:

$$\rho = \rho_0 (p / 1000)(273,15 / T) = 0,348 p / T;$$

$$\rho_{\text{л}} = 917 (1 - 1,58 \cdot 10^{-4} t), t = -50 \dots 0^{\circ} \text{C}.$$

Теплота фазових переходів:

$$\text{вода} \leftrightarrow \text{пара: } L = 2,50 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$\text{лід} \leftrightarrow \text{пара: } L_c = 2,84 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг};$$

$$\text{вода} \leftrightarrow \text{лід: } L^* = 3,34 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}.$$

### 3 ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ СТУДЕНТІВ

#### 3.1 Методика оцінки всіх видів підготовки студентів

Кредитно-модульна система оцінки знань, вмінь та навичок передбачає розподіл програми навчальної дисципліни «Прикладна метеорологія» з блоками змістовних модулів «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси» на структурно-логічні завершені змістовні модулі, оцінюються певною кількістю балів.

Чотири змістових модуля: чотири з теоретичної частини курсу – ЗМ–Л1, ЗМ–Л2, ЗМ–Л3, ЗМ–Л4 та два з практичної частини – ЗМ–П1, ЗМ–П2. Види завдань та кількість балів, що нараховані за їх вчасне виконання, додаються у такій таблиці:

№ п/п	Види завдань, за які нараховуються бали	Максимальна кількість балів, яка може бути нарахована змістовні модулі
<b>Теоретичний змістовий модуль №1 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»</b>		
1	Контрольна робота №1: «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері».	15
<b>Теоретичний змістовий модуль №2 блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»</b>		
2	Контрольна робота №2: «Хмари. Атмосферна електрика. Оподи».	15
3	Загальна сума по теоретичному модулю блоку «Фізика хмар та опадів»	30
<b>Теоретичний змістовий модуль №1 блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»</b>		
4	Контрольна робота №3: «Фазові переходи води в атмосфері та шляхи управління ними. Турбулентні струмені в атмосфері».	10
<b>Теоретичний змістовий модуль №2 блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»</b>		
5	Контрольна робота №4: «Управління процесами хмаро та опадоутворення. Розсіювання туманів. Вплив на електричні процеси в хмарах».	10
6	Загальна сума по теоретичному модулю	20

	«Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»	
	Загальна сума по теоретичним модулям	50
<b>Практичний змістовий модуль блоку змістовних модулів «Фізика хмар та опадів»</b>		
1	Практична робота №1: «Зростання часток опадів в переохолоджених шаруватих хмарах. Зростання крапель та граду в могутніх конвективних хмарах»	25
<b>Практичний змістовий модуль блоку змістовних модулів «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»</b>		
2	Практична робота №2: «Розповсюдження реагентів у хмарах. Тепловий метод розсіяння туманів»	25
	Загальна сума по практичним модулям	50
<b>Загальна кількість балів з дисципліни</b>		<b>100</b>

Форма контролю рівня засвоєння змістових модулів (ЗМ):

- опитування під час практичних та лекційних занять;
- розв'язування задач під наглядом викладача в аудиторії;
- письмові контрольні роботи з теоретичної частини.

Сума отриманих балів складається з суми виконаних своєчасно контрольних заходів. Максимальна сума балів, яку може набрати студент, складає 100 балів, з них по теоретичному курсу – 50 балів, по практичній частині – 50 балів.

При проведенні атестації студент вважається атестованим, якщо він набрав  $\geq 60\%$  від максимальної суми балів за модулями, які затверджені на момент атестації.

Оцінка з дисципліни виставляється за результатами усереднення між кількісною оцінкою контролюючих заходів та кількісною оцінкою екзамену.

#### Шкала переходу до якісної 4-бальної системи оцінювання

За шкалою ECTS	За національною системою	Визначення	За системою університету (у відсотках)
A	5 (відмінно)	Відмінне виконання лише з незначною кількістю помилок	90-100
B	4 (добре)	Вище середнього рівня з кількома помилками	82-89,9

C	4 (добре)	В загальному правильна робота з певною кількістю грубих помилок	74-81,9
D	3 (задовільно)	Непогано, але зі значною кількістю помилок	64-73,9
E	3 (задовільно)	Виконання задовольняє мінімальні критерії	60-63,9
FX	2 (незадовільно)	З можливістю перескласти	35-59,9
F	2 (незадовільно)	З обов'язковим повторним курсом навчання	1-34,9

### 3.2 Перелік базових знань та вмінь

Узагальнюючи інформацію, що викладена в підпунктах 2.1 та 2.2, можна навести повний перелік базових знань та вмінь з дисципліни «Прикладна метеорологія», яка містить блоки змістовних модулів: «Фізика хмар та опадів» та «Фізичні основи впливу на атмосферні процеси»:

1) Змістовний лекційний модуль № 1 «Фізика формування рідких та твердих фаз води в атмосфері»:

- будова молекул водяної пари;
- сили, які призводять до об'єднання молекул водяної пари у комплекси;
- нестійкі та стійкі комплекси молекул водяної пари
- фізичні механізми, які приводять до конденсації атмосферної водяної пари;
- моделювання умови створення крапель опадів.

2) Змістовний лекційний модуль № 2 «Хмари. Атмосферна електрика. Опади»:

- кінематика формування, зростання та випаровування крапель і кристалів у хмарах;
- формування опадів та динаміку атмосферних конвективних рухів;
- динаміка формування хмар шаруватих та купчасто-дощових форм;
- структура полів метеорологічних величин у зоні хмар і туманів;
- механізм утворення грози;

- розраховувати зростання крапель та граду у потужних купчасто-дощових хмарах.

3) Змістовний лекційний модуль № 3 «Фазові переходи води в атмосфері та шляхи управління ними. Турбулентні струмені в атмосфері»:

- основні фізичні закономірності розвитку атмосферних процесів, шляхи управління атмосферними процесами;
- кристалізуюча дія холодореагентів, гігроскопічні та поверхнево-активні речовини;
- трансформація спектра хмарних крапель при внесенні реагентів;
- основні властивості вільних турбулентних струменів; сучасні методики впливу;
- процес розповсюдження реагенту при різних засобах внесення у хмарах.

4) Змістовний лекційний модуль № 4 «Управління процесами хмаро та опадоутворення. Розсіювання туманів. Вплив на електричні процеси в хмарах»:

- технічні засоби активного впливу;
- засоби активної і пасивної локації для спостереження за хмарними системами;
- показники оперативної оцінки фізичної ефективності і управління активним впливом;
- процеси, які відбувається в хмарі після введення кристалізуючого реагенту;
- енергетичні витрати, які необхідні для розсіяння туманів понад ВПС.