

Кафедра автоматизації управління технологічними процесами

## **ФІЗИЧНІ ОСНОВИ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ**

Методичні вказівки до виконання практичних занять  
за напрямом 6.050202 – Автоматизація  
та комп'ютерно-інтегровані технології

Укладач: Л.М. Дегтярьова

Метою методичних вказівок є закріплення теоретичного матеріалу, отриманого під час лекційних занять, та отримання навичок під час практичних занять.

Методичні вказівки призначені для студентів денної та заочної форм навчання ННІ «Комп'ютерних технологій, автоматизації та логістики» бакалаврської підготовки за напрямом 6.050202 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

**СХВАЛЕНО**

на засіданні кафедри автоматизації  
управління технологічними процесами  
та рекомендовано до друку  
Протокол № 10  
від «22» червня 2012 р.

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

методичною радою  
академії зв'язку  
Протокол № 16  
від 23.03.2012 р.

## ЗМІСТ

Передмова .....	4
Модуль 2.3.....	5
<b>1. Практичне заняття № 1 Розрахунок температури та атмосферного тиску .....</b>	<b>6</b>
1.1 Температура .....	6
1.2 Атмосферний тиск.....	7
<b>2. Практичне заняття № 2 Сонячна радіація.....</b>	<b>12</b>
2.1 Сонячна радіація на верхній межі атмосфери.....	12
2.2 Ослаблення сонячної радіації при її проходженні крізь атмосферу.....	15
2.3 Прихід сонячної радіації на земну поверхню.....	17
<b>3. Практичне заняття № 3 Розрахунок коефіцієнта турбулентності.....</b>	<b>23</b>
3.1 Методи визначення коефіцієнта турбулентності.....	23
3.2 Фактори турбулентності.....	27
<b>4. Практичне заняття № 4 Тепловий режим ґрунту.....</b>	<b>36</b>
4.1 Теплофізичні характеристики ґрунту.....	36
4.2 Теоретичні закони поширення коливань температури в ґрунті.....	40
4.3 Тепловий потік у ґрунті.....	43
Література .....	54
Додаток 1 .....	55
Додаток 2.....	56
Додаток 3 .....	57
Додаток 4.....	57
Додаток 5.....	58
Додаток 6.....	59
Додаток 7.....	60

## **ПЕРЕДМОВА**

Дисципліна «Фізичні основи моніторингу атмосферного повітря» є вибірковою дисципліною циклу професійної та практичної підготовки студентів напряму 6.050202 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Вона розглядає фізичні процеси, які відбуваються в атмосфері, взаємодію атмосферних об'єктів один з іншим, а також із земною поверхнею та космічним середовищем.

Вивчення дисципліни передбачає крім лекційних занять виконання практичних занять, які дають студентам навички з обчислення параметрів атмосфери та проведення аналізу їх фізичного змісту.

## Модуль 2.3

Дисципліна «Фізичні основи моніторингу атмосферного повітря» (ФОМАП) викладається в семестрі 2.3.

Загальна характеристика дисциплін: кількість кредитів ECTS-5, модулів – 2, змістових модулів – 2. Загальна кількість годин – 180; у т.ч. лекцій – 46 год., практичних занять – 18 год., самостійна робота – 74 год., індивідуальна робота – 22 год., вид контролю – залік.

Протягом семестру проводяться 4-и практичні заняття, на яких студенти отримують навички з розрахунку атмосферного тиску та приведення його до рівня моря; визначення кількості сонячної радіації, що надійшла до земної поверхні, визначення показника прозорості атмосфери, ослаблення та розсіювання сонячної радіації; з розрахунку коефіцієнта турбулентності; теплофізичних характеристик ґрунту.

## Практичне заняття № 1

### РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРИ ТА АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ

*Мета роботи* – вміти розраховувати температуру для різних шкал та знаходити атмосферний тиск для даного місця спостережень, враховуючи поправки.

#### Теоретична частина

##### 1.1 Температура

Температура є однією з основних величин, які характеризують тепловий стан системи і вимірюється термометрами. Температуру повітря виражають в градусах термодинамічної температурної шкали, які називають кельвінами (K), або в градусах Міжнародної практичної температурної шкали (1968 р.), що зветься градусами Цельсія (°C).

В минулому, а в ряді країн і нині використовуються також температурні шкали Реомюра (°R), Фаренгейта (°F), Ренкіна (°Re) та інші. Деякі з них до цих пір зустрічаються в старовинних приладах. Температуру повітря звичайно вимірюють з точністю до десятих долей градуса Цельсія. При теоретичних розрахунках її частіше виражають в кельвінах з тією ж точністю.

При переводі показань температури з однієї шкали в іншу використовують перехідні формули:

$$t^{\circ C} = (t + 273,15) K ,$$
$$m^{\circ R} = \left( \frac{5}{4} m \right)^{\circ C} = \left( \frac{5}{4} m + 273,15 \right) K ,$$
$$n^{\circ F} = \left[ \frac{5}{9} (n - 32) \right]^{\circ C} = \left( \frac{5}{9} n + 255,37 \right) K ,$$
$$p^{\circ Re} = \left[ \frac{5}{9} (p - 491,67) \right]^{\circ C} = \left( \frac{5}{9} p \right) K .$$

**Задача 1.1.** Знайти температуру повітря в K і в °C, якщо старовинний вуличний термометр показує  $-32^{\circ R}$ .

**Задача 1.2.** Виразити в K і в °C температуру 0,0; 14,0; 77,0 і 122,0 °F.

**Задача 1.3.** У розповіді Дж.Лондона «За тех, хто в пути» дія відбувається на Алясці при температурі повітря  $-74,0^{\circ F}$ . Виразити цю температуру в K і в °C.

**Задача 1.4.** Максимальна температура повітря на стандартній висоті метеорологічних спостережень (2м) склала  $57,8^{\circ C}$  і спостерігалася 11 серпня 1933

року в Сан-Луїсі (Мексика) та 13 вересня 1922 року в Ель-Азізії (Лівія). За не цілком достовірними даними, у Ваді-Хальфа (Судан) вона досягала навіть 61,0 °С. Мінімальна температура повітря (-88,3 °С) зафіксована 24 серпня 1960 року на радянській антарктичній станції «Восток-1». Виразити ці температури в К.

## 1.2 Атмосферний тиск

Атмосферний тиск – це вага гідростатичного стовпа повітря одиничного перерізу від рівня, на якому вимірюється атмосферний тиск, до верхньої межі атмосфери. Атмосферний тиск виражається в гектопаскалях (1 гПа = 10<sup>2</sup> Па = = 10<sup>2</sup> Н/м<sup>2</sup>). Для вимірювання тиску нерідко використовуються барометри зі шкалами, градуйованими в одиницях, які раніше застосовувалися – мілібарах (мбар) або міліметрах ртутного стовпа (мм рт.ст.). Співвідношення між цими одиницями такі:

$$1 \text{ мбар} = 1 \text{ гПа} = 0,750 \text{ 062 мм рт.ст.}$$

$$1 \text{ мм рт. Ст.} = 1,333 \text{ 224 мбар} = 1,333 \text{ 224 гПа.}$$

Вимірювання і розрахунки атмосферного тиску робляться з точністю до десятих часток прийнятих одиниць. За нормальний тиск вважається тиск 760 мм рт. ст. або 1013 гПа.

Для вимірювання атмосферного тиску в стаціонарних умовах застосовується станційний чашковий барометр. В його показання ( $P$ ) вводяться 2 поправки: постійна  $\Delta P_{\Pi}$  і температурна  $\Delta P_t$ . Перша поправка є алгебраїчною сумою інструментальної поправки  $\Delta P_1$ , що вказується в паспорті приладу, поправки на приведення до прискорення вільного падіння на широті 45° ( $\Delta P_g(\varphi)$ ) і на рівні моря ( $\Delta P_g(z)$ ), тобто

$$\Delta P_{\Pi} = \Delta P_1 + \Delta P_g(\varphi) + \Delta P_g(z),$$

де

$$\Delta P_g(\varphi) = -2,64 \cdot 10^{-3} P \cos 2\varphi,$$

$$\Delta P_g(z) = -3,14 \cdot 10^{-7} P z,$$

де  $\varphi$  – широта місця вимірювання тиску;

$z$  – висота (м) чашки барометра над рівнем моря.

Температурна поправка приводить показання барометра до температури 0,0°С:

$$\Delta P_t = -1,63 \cdot 10^{-4} P t,$$

де  $t$  - температура ( $^{\circ}\text{C}$ ) барометра. Тоді істинний тиск на станції можна знайти за формулою:

$$P_c = P + \Delta P_{\Pi} + \Delta P_t.$$

При вимірюванні атмосферного тиску в польових умовах використовується барометр-анероїд. В його показання вносяться три поправки – шкалова, температурна і додаткова. Вони подаються в паспорті приладу, причому температурна поправка звичайно відповідає зміні температури приладу на  $1^{\circ}\text{C}$ .

**Задача 1.5.** Вивести співвідношення між мм. рт. ст. і гПа. Прискорення вільного падіння поблизу земної поверхні прийняти рівним  $9,80665 \text{ м/с}^2$ . Визначити тиск, створений ртутним стовпом висотою 1 мм і з перерізом  $1 \text{ м}^2$  при нормальних умовах, за яких густина ртуті складає  $12595,1 \text{ кг/м}^3$ .

**Задача 1.6.** Максимальний тиск на рівні моря 812,9 мм рт. ст. спостерігався 31 грудня 1968 року на станції Агата Красноярського краю, а мінімальний – 641,1 мм рт. ст. у вересні 1961 року в тайфуні Ненсі над Тихим океаном. Виразити ці значення в гПа і знайти їх відносні відхилення від нормального тиску.

**Задача 1.7.** Показання станційного чашкового барометра 967,6 мбар, інструментальна поправка даного барометра 0,2 мбар, широта місця  $55^{\circ}$ , висота чашки барометра над рівнем моря 300 м, показання термометра при барометрі  $14,8^{\circ}\text{C}$ , його поправка  $-0,1^{\circ}\text{C}$ . Обчислити поправки, ввести їх в показання барометра і знайти тиск на станції.

**Задача 1.8.** Показання станційного чашкового барометра 975,4 мбар, постійна поправка 1,5 мбар, показання термометра при барометрі  $9,8^{\circ}\text{C}$ , його поправка  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Знайти тиск на станції в гПа і в мм рт. ст..

**Задача 1.9.** Показання барометра-анероїда 745,4 мм рт.ст., шкалова поправка при 740,0 мм дорівнює  $(-0,1)$  мм, при 750 мм  $(-0,3)$  мм, показання термометра при барометрі  $11,5^{\circ}\text{C}$ , температурна поправка на  $1^{\circ}\text{C}$  складає  $(-0,04)$  мм, додаткова поправка 2,7 мм. Знайти тиск в мм рт.ст і в гПа.

**Задача 1.10.** Перевести в Па атмосферний тиск  $10 \text{ кН/м}^2$ .

### Домашнє завдання

**Задача 1.10\*.** Показання станційного чашкового барометра 729,8 мм рт.ст., постійна поправка 1,7 мм рт.ст, показання термометра при барометрі  $9,9^{\circ}\text{C}$ , його поправка  $0,3^{\circ}\text{C}$ . Знайти тиск на станції в мм рт.ст. і в гПа.

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці.



№ варіанта	$P$ , мм рт.ст	$\Delta P_{\text{П}}$ , мм рт.ст	$t^{\circ}\text{C}$	$\Delta t,^{\circ}\text{C}$
1	730,0	1,6	10,0	0,5
2	730,9	1,1	10,5	0,0
3	731,8	1,4	11,0	-0,4
4	732,7	1,5	12,5	0,1
5	733,3	1,0	13,0	0,5
6	733,9	1,2	13,5	0,0
7	730,2	1,5	10,1	0,4
8	731,0	1,0	10,6	-0,1
9	731,9	1,5	11,1	-0,3
10	732,9	1,4	12,6	0,2
11	733,4	0,9	13,1	0,4
12	733,0	1,3	13,6	-0,1
13	730,4	1,4	10,2	0,3
14	731,2	1,1	10,7	-0,2
15	732,1	1,6	12,2	-0,2
16	733,0	1,3	12,7	0,3
17	733,6	1,0	13,2	0,3
18	733,2	1,4	13,7	-0,2
19	730,6	1,3	10,3	0,2
20	731,4	1,2	10,8	-0,3
21	732,3	1,7	12,3	-0,1
22	733,0	1,2	12,8	0,4
23	733,7	1,0	13,3	0,2
24	733,4	1,5	13,8	-0,3
25	730,8	1,2	10,4	0,1
26	731,6	1,3	10,9	-0,4
27	732,5	1,6	12,4	0,0
28	733,1	1,1	12,9	0,5
29	733,8	1,1	13,4	0,1
30	733,5	1,6	13,9	-0,4

**Задача 1.11.** Показання станційного чашкового барометра 1008,5 мбар, інструментальна поправка даного барометра 0,1 мбар, широта місця  $50^{\circ}$ , висота чашки барометра над рівнем моря 200 м, показання термометра при барометрі  $17,2^{\circ}\text{C}$ , його поправка  $-0,2^{\circ}\text{C}$ . Обчислити поправки, ввести їх в показання барометра і знайти тиск на станції.

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці.

№ варіанта	$P$ , мбар	$\Delta P_1$ , мбар	$\varphi$ , °	$z$ , м	$t_6$ , °C	$\Delta t$ , °C
1	998,0	0,2	46	150	17,0	0,4
2	1007,9	0,1	50	380	15,5	0,3
3	1011,3	0,4	40	200	21,0	-0,4
4	1012,7	0,2	52	175	22,5	0,3
5	1003,3	0,1	60	140	23,0	-0,5
6	985,9	0,2	65	274	18,5	0,3
7	1011,8	0,3	48	300	14,4	-0,4
8	1011,0	0,1	55	305	13,3	-0,1
9	1016,2	0,2	51	290	15,1	-0,3
10	1002,7	0,4	42	180	18,6	0,2
11	1000,4	0,1	60	205	13,6	0,3
12	1009,0	0,3	63	175	15,6	-0,1
13	990,9	0,2	50	340	17,2	-0,3
14	991,5	0,1	57	400	18,7	-0,2
15	1002,1	0,1	68	125	14,2	-0,2
16	1013,0	0,3	30	280	16,1	0,3
17	1018,6	0,1	65	340	18,2	0,3
18	1004,2	0,4	58	255	18,7	-0,2
19	1000,6	0,3	63	125	13,3	0,2
20	991,4	0,2	62	200	19,8	-0,3
21	998,3	0,3	55	310	11,3	0,1
22	895,0	0,2	35	340	12,6	0,4
23	1013,7	0,1	35	270	17,5	0,2
24	1020,4	0,2	60	205	13,8	0,3
25	1014,8	0,2	65	330	12,4	0,1
26	951,6	0,3	52	70	18,9	0,4
27	892,5	0,2	44	110	12,9	0,2
28	1008,1	0,1	48	230	16,9	0,3
29	1005,8	0,1	55	360	13,8	0,1
30	943,5	0,2	67	250	15,9	0,4

**Контрольні питання:**

1. Дайте поняття температури.
2. Які існують температурні шкали?
3. Дайте поняття абсолютної температури.
4. В яких одиницях вимірюється абсолютна температура ?
5. Що таке абсолютний нуль ?
6. Що становить собою термодинамічна температурна шкала ?
7. Дайте визначення атмосферному тиску.
8. В яких одиницях вимірюють атмосферний тиск ?
9. Наведіть співвідношення між одиницями вимірювань атмосферного тиску.
10. Які існують поправки для розрахунку атмосферного тиску ?
11. Який тиск вважається нормальним ?
12. Чи залежить постійна поправка від місця установки барометра ?

## Практичне заняття № 2

### СОНЯЧНА РАДІАЦІЯ

*Мета роботи* – розрахунок приходу сонячної радіації на земну поверхню та ослаблення сонячної радіації при проходженні через атмосферу.

#### Теоретична частина

##### 2.1 Сонячна радіація на верхній межі атмосфери.

Енергія, яку випромінює Сонце, носить назву *сонячної радіації*. До сонячної радіації з деякими обмеженнями застосовуються закони теплового випромінювання чорних тіл:

1) закон зміщення (закон Вина)

$$\lambda_{\max} T = 2898, \quad (2.1)$$

де  $\lambda_{\max}$  – довжина хвилі (мкм), на яку припадає найбільша енергія в спектрі випромінювання Сонця,

$T$  – ярісна температура Сонця (К);

2) закон Стефана-Больцмана

$$E = \sigma T^4, \quad (2.2)$$

де  $E$  – енергетична світність Сонця (Вт/м<sup>2</sup>),

$\sigma$  – стала Стефана-Больцмана (додаток 1),

$T$  – радіаційна температура Сонця (К).

Енергетична освітленість сонячною радіацією горизонтальної поверхні на верхній межі атмосфери визначається із співвідношення

$$I_0' = I_0 \sin h_*, \quad (2.3)$$

де  $I_0$  – сонячна стала (додаток 1),

$h_*$  – висота Сонця в момент, для якого обчислюється  $I_0'$ .

Значення  $I_0'$  прийнято виражати в кВт/м<sup>2</sup> з точністю до сотих. Значення  $h_*$  на широті  $\varphi$  в момент, коли часовий кут Сонця дорівнює  $\tau_*$ , визначається за формулою

$$\sin h_* = \sin \varphi \sin \delta_* + \cos \varphi \cos \delta_* \cos \tau_*, \quad (2.4)$$

де  $\delta_*$  – схиляння Сонця в істинний полудень даної доби.

Під час розв'язання задач можна використовувати значення  $\delta_*$  для 1984 року, які подані в додатку 2. З формули (2.4) випливає, що в істинний полудень, коли  $\tau_* = 0,0^\circ$

$$h_* = 90 - \varphi + \delta_*. \quad (2.5)$$

Добова енергетична сума сонячної радіації на горизонтальну поверхню на верхній межі атмосфери для будь-якої дати розраховується за формулою

$$\sum_{\text{доб}} T I_0' = \frac{I_0 t}{\pi} (\tau_{*,0} \sin \varphi \sin \delta_* + \cos \varphi \cos \delta_* \sin \tau_{*,0}), \quad (2.6)$$

де  $t$  – період добового обертання Землі (додаток 1),

$\tau_{*,0}$  – часовий кут Сонця в момент сходу ( $-\tau_{*,0}$ ) або заходу ( $+\tau_{*,0}$ ), який визначається зі співвідношення

$$\cos \tau_{*,0} = -\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta_*, \quad (2.7)$$

причому у формулі (2.6) в першій складовій  $\tau_{*,0}$  виражено в радіанах, а в другій – в градусній мірі. На широтах більше  $66,5^\circ$  в період полярного дня  $\tau_{*,0} = 180^\circ$ .

Значення  $\sum_{\text{доб}} T S_0'$  прийнято виражати в МДж/м<sup>2</sup> з точністю до сотих.

При розв'язанні ряду задач необхідно знати моменти сходу і заходу Сонця в годинах і хвилинах. Для їх знаходження потрібно значення  $\tau_{*,0}$ , отримане за формулою (2.7), перевести з градусної міри в одиниці часу ( $1^\circ = 4$  хв,  $1' = 4$  с). Тоді отримаємо істинний сонячний час сходу і заходу за астрономічним відліком, тобто відрахований від дійсного сонячного полудня. Для переходу до цивільного відліку, що ведеться від попередньої півночі, використовують співвідношення

$$\tau_{*,0,u} = 12 \text{ год } 00 \text{ хв } 00 \text{ с} \pm \tau_{*,0},$$

де знак мінус відповідає моменту сходу, а знак плюс – моменту заходу. Для переходу від  $\tau_{*,0}$  до відповідних моментів літнього або зимового дискретного часу (поясного) застосовуються правила, викладені в курсах астрономії.

**Задача 2.1.** При екстраполяції наземних, ракетних та супутникових вимірювань на верхню межу атмосфери отримано такий розподіл спектральної густини енергетичної освітленості сонячною радіацією, яка перпендикулярна до променів поверхні ( $I_{\lambda_0}$ , кВт/(м<sup>2</sup>·мкм)) за довжинами хвиль ( $\lambda$ , мкм):

$\lambda$	$I_{\lambda_0}$	$\lambda$	$I_{\lambda_0}$	$\lambda$	$I_{\lambda_0}$	$\lambda$	$I_{\lambda_0}$	$\lambda$	$I_{\lambda_0}$
0,16	0,000	0,34	1,076	0,52	1,833	0,70	1,369	2,00	0,103
0,18	0,001	0,36	1,068	0,54	1,783	0,72	1,314	3,00	0,031
0,20	0,011	0,38	1,120	0,56	1,695	0,75	1,235	4,00	0,009
0,22	0,057	0,40	1,429	0,58	1,715	0,80	1,107	5,00	0,004
0,24	0,063	0,42	1,747	0,60	1,666	1,00	0,746	6,00	0,002
0,26	0,130	0,44	1,810	0,62	1,602	1,20	0,484	7,00	0,001
0,28	0,222	0,46	2,066	0,64	1,544	1,40	0,336	8,00	0,001
0,30	0,514	0,48	2,074	0,66	1,486	1,60	0,244	10,00	0,000
0,32	0,830	0,50	1,942	0,68	1,427	1,80	0,159		

Подати графічно і проаналізувати спектр сонячної радіації, що надходить до Землі. Знайти за графіком довжину хвилі, на яку припадає найбільша енергія. В якій області лежить ця хвиля? Проінтегрувати функцію  $I_{\lambda_0}(\lambda)$  в межах  $\lambda$  від 0,16 до 10,00 мкм і знайти сонячну сталу. Обчислити частки ультрафіолетової ( $\lambda < 0,40$  мкм), видимої ( $\lambda = 0,40 - 0,76$  мкм) та інфрачервоної ( $\lambda > 0,76$  мкм) радіації в загальному потоці сонячної радіації до Землі.

**Задача 2.2.** Випромінення Сонця приблизно відповідає випроміненню чорного тіла з радіаційною температурою 5805 К. Обчислити енергетичну світність Сонця і повний потік випромінення всієї його поверхні. Знайти сонячну сталу, вважаючи Сонце точковим чорним джерелом, що знаходиться в центрі сфери, радіус якого дорівнює середній відстані між центрами Сонця і Землі. Порівняти отриманий результат зі значенням  $I_0$ , отриманим в задачі 2.1.

**Задача 2.3.** Обчислити енергетичну освітленість сонячною радіацією на верхній межі атмосфери при висотах Сонця 0, 15, 30, 45, 60, 75 і 90°. Побудувати та проаналізувати графік функції  $I'_0(h_*)$ .

**Задача 2.4.** Обчислити теоретичні добові суми сонячної радіації 21 червня на екваторі та 30, 60 і 90° пн.ш. Побудувати графік залежності  $\sum_{\text{доб}} I'_0$  від широти. Чим пояснюється широтна зміна цієї величини в заданий день?

**Задача 2.5.** Обчислити теоретичні добові суми сонячної радіації 22 грудня на екваторі та 30, 60 і 90° пн.ш. Результати нанести на графік, побудований в задачі 2.4. Як і чому змінилися значення  $\sum_{\text{доб}} I'_0$  на кожній з розглядуваних широт?

**Задача 2.6.** Обчислити теоретичні добові суми сонячної радіації на екваторі та 30, 60 і 90° пн.ш. в дні весняного та осіннього рівнодення,

вважаючи, що в ці дні  $\delta_* = 0$ . Результати нанести на графік, побудований в задачі 2.4. Зробити порівняння.

## 2.2 Ослаблення сонячної радіації при її проходженні крізь атмосферу.

Ослаблення прямої сонячної радіації при її проходженні від верхньої межі атмосфери до земної поверхні характеризується законом Буге

$$I_{\perp} = I_0 P^m, \quad (2.8)$$

де  $I_{\perp}$  – енергетична освітленість прямою сонячною радіацією, перпендикулярною до променів площадки біля земної поверхні;

$I_0$  – сонячна стала;

$P$  – інтегральний коефіцієнт прозорості атмосфери (коефіцієнт прозорості);

$m$  – оптична маса атмосфери, крізь яку пройшли сонячні промені.

Значення  $m$  при різній висоті Сонця  $h_*$  знаходяться в табл. Бемпорада (додаток 3). При  $h_* > 30^\circ$  вони можуть бути знайдені також за формулою

$$m = \frac{1}{\sin h_*}. \quad (2.9)$$

Вираз для коефіцієнта прозорості у відповідності з формулою (2.8) має вигляд

$$P = \left( \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (2.10)$$

Методика подання значень  $P$ , які знайдені при різних  $m$ , до  $m = 2$  розроблена Сівковим С.І. Вона полягає в наступному:

а) за вимірним  $I$  та датою вимірювання знаходиться поправка  $\Delta I$  для приведення  $I$  до середньої відстані  $R$  від Землі до Сонця (додаток 4), після чого обчислюється

$$I_R = I + \Delta I; \quad (2.11)$$

б) за  $I_R$  і висотою Сонця,  $I_R$  приводиться до  $h_* = 30^\circ$  ( $m = 2$ ), тобто визначається  $I_{R, 30^\circ}$  (додаток 5);

в) за  $I_{R, 30^\circ}$  знаходиться приведений до  $m = 2$  коефіцієнт прозорості  $P_2$  (додаток 6).

Іншими характеристиками ослаблення сонячної радіації при проходженні через атмосферу може служити коефіцієнт ослаблення  $c$ , введений Кастровим В. Г.:

$$c = \frac{I_0 - I}{I \cdot m}, \quad (2.12)$$

і фактор каламутності

$$T = \frac{\lg P}{\lg P_1}, \quad (2.13)$$

де  $P_1$  – коефіцієнт прозорості ідеальної атмосфери, значення якого змінюється в залежності від  $m$ :

$m$ .....	1	2	3	4	5	8	10
$P_1$ .....	0,906	0,916	0,922	0,927	0,935	0,941	0,946

Значення  $T$  визначаються з точністю до сотих.

Ослаблення радіації, викликане тільки молекулярним розсіюванням, характеризується коефіцієнтом молекулярного розсіювання  $\sigma_m$ . Останнє являє собою частку радіації, що надійшла, розсіяну одиничним об'ємом повітря. Для будь-якої довжини хвилі  $\lambda$

$$\sigma_m \approx \frac{1}{\lambda^4}. \quad (2.14)$$

**Задача 2.7.** Знайти оптичні маси атмосфери, крізь які проходять сонячні промені при всіх висотах Сонця, кратні  $10^\circ$ . Побудувати графік функції  $m(h_*)$ . Пояснити характер даної залежності. Використовувати додаток 3.

**Задача 2.8.** Знайти оптичні маси атмосфери, крізь які проходять сонячні промені, в полудень 21 червня та 22 грудня на широтах  $68^\circ$ ,  $56^\circ$  і  $41^\circ$  пн.ш. Яке значення має зміна  $m$  з широтою і протягом року для приходу сонячної радіації на земну поверхню?

**Задача 2.9.** При висоті Сонця  $30^\circ$  пряма радіація на перпендикулярну поверхню склала  $0,72 \text{ кВт/м}^2$ , а при висоті Сонця  $55^\circ$  -  $0,82 \text{ кВт/м}^2$ . Обчислити коефіцієнт прозорості для обох випадків. Якщо припустити, що вихідні дані отримані в один і той же день в одному і тому ж пункті, чи можна стверджувати, що за проміжок часу між вимірюваннями, змінився оптичний стан атмосфери? Чи могла інша причина викликати зміну  $P$ ?

**Задача 2.10.** В якомусь пункті в один і той же день двічі виміряна пряма сонячна радіація на перпендикулярну поверхню: при висоті Сонця  $90^\circ$  вона склала  $0,98 \text{ кВт/м}^2$ , а при висоті Сонця  $30^\circ$  -  $0,70 \text{ кВт/м}^2$ . Вважаючи, що в



період між вимірюваннями оптичний стан атмосфери не змінився, обчислити коефіцієнт прозорості і сонячну сталу.

**Задача 2.11.** 18 вересня при висоті Сонця  $42^\circ$  пряма сонячна радіація на перпендикулярну поверхню склала  $0,63 \text{ кВт/м}^2$ . Знайти коефіцієнт прозорості при оптичній масі, що дорівнює 2.

**Задача 2.12.** 1 вересня при висоті Сонця  $30^\circ$  пряма сонячна радіація на перпендикулярну поверхню склала  $0,68 \text{ кВт/м}^2$ , а при  $10^\circ$  -  $0,36 \text{ кВт/м}^2$ . Обчислити коефіцієнти ослаблення  $s$  (за Кастровим) і коефіцієнти прозорості – не приведені і при  $m=2$ . Чи змінився стан атмосфери в інтервалі між спостереженнями?

**Задача 2.13.** При висоті Сонця  $42^\circ$  пряма сонячна радіація на перпендикулярну поверхню дорівнює  $0,63 \text{ кВт/м}^2$ . Знайти фактор каламутності.

### 2.3 Прихід сонячної радіації на земну поверхню.

Пряма сонячна радіація на перпендикулярну поверхню  $I_\perp$  вимірюється безпосередньо або розраховується за формулою (2.8). Енергетична освітленість прямою сонячною радіацією горизонтальної поверхні  $I'$  також вимірюється безпосередньо або розраховується за формулою

$$I' = I_0 \sin h_* . \quad (2.15)$$

Енергетична освітленість прямою сонячною радіацією поверхні, яка нахилена під кутом  $\alpha$  до горизонту і орієнтована в будь-яку сторону ( $I_H$ ), складає

$$I_H = I_\perp \left[ \sin h_* \cos \alpha + \cos h_* \sin \alpha \cos(\psi_* - \psi_\Pi) \right] , \quad (2.16)$$

де  $\psi_*$  – азимут Сонця;

$\psi_\Pi$  – азимут поверхні.

Значення  $\psi_*$  та  $\psi_\Pi$  відлічуються від півдня до півночі через захід (від 0 до  $180^\circ$ ) або через схід (від 0 до  $-180^\circ$ ). При такому відліку  $\psi_\Pi$  є кут між напрямком на південь і горизонтальною проекцією нормалі до поверхні. (В геодезії та топографії прийнято  $\psi_*$  і  $\psi_\Pi$  відлічувати від півночі за годинниковою стрілкою від 0 до  $360^\circ$ ). Для стислості надалі величину  $I_H$  будемо називати прямою радіацією на похилу поверхню.

**Задача 2.14.** Обчислити пряму радіацію на перпендикулярну поверхню при висоті Сонця  $53^\circ$  і коефіцієнті прозорості 0,751. Знайти частку обчисленої величини від сонячної радіації, яка приходить до такої ж поверхні на верхній межі атмосфери.

**Задача 2.15.** Обчислити пряму радіацію на перпендикулярну поверхню на  $56^\circ$  пн.ш. 15 липня при висотах Сонця  $10, 20, 30^\circ$  і т.д. до максимальної висоти, яка можлива в даний день, якщо коефіцієнт прозорості дорівнює  $0,710$ . Побудувати і проаналізувати графік денної зміни прямої радіації. Чому пряма радіація змінюється зі зміною висоти Сонця при незмінній прозорості атмосфери ?

**Задача 2.16.** Обчислити пряму радіацію на перпендикулярну поверхню при висотах Сонця  $30$  і  $60^\circ$ , якщо коефіцієнт прозорості складає  $0,500; 0,600; 0,700; 0,800$ . Побудувати і проаналізувати графік залежності  $I(P)$  при заданих висотах Сонця.

**Задача 2.17.** Середні часові дійсні суми прямої радіації на перпендикулярну поверхню ( $\text{МДж/м}^2$ ) в червні:

Пункт	Інтервал, год							
	0 - 1	3 - 4	6 - 7	9 - 10	12 - 13	15 - 16	18 - 19	21 - 22
Якутск	0,00	0,38	1,30	1,67	1,59	1,30	0,96	0,04
Карадаг	0,00	0,00	1,42	2,09	2,05	1,84	0,92	0,00

Побудувати і проаналізувати графік добового ходу. Обчислити дійсні добові суми прямої радіації.

**Задача 2.18.** Дійсні місячні суми прямої радіації на перпендикулярну поверхню в одному з пунктів на  $60^\circ$  пн.ш. :

Місяць .....	II	IV	VI	VIII	X	XII
$\sum_{\text{міс}} I, \text{МДж/м}^2$ .....	112	394	606	450	137	31

Побудувати і проаналізувати графік річного ходу місячних сум. Обчислити дійсну річну суму прямої радіації. Як і чому змінюється графік і сума для більш північного (південного) пункту при незмінному стані атмосфери ?

**Задача 2.19.** Пряма радіація на перпендикулярну поверхню при висоті Сонця  $34^\circ$  склала  $0,78 \text{ кВт/м}^2$ . Обчислити пряму радіацію на горизонтальну поверхню. Чи завжди між цими величинами зберігається таке співвідношення ?

**Задача 2.20.** Обчислити пряму радіацію на горизонтальну поверхню при висоті Сонця  $36^\circ$  і коефіцієнті прозорості  $0,722$ . Як і чому зміниться відповідь при зміні однієї із заданих величин ?

**Задача 2.21.** Обчислити пряму радіацію на горизонтальну поверхню на  $60^\circ$  пн.ш. істинного полудення 21 червня і 22 грудня, якщо пряма радіація на перпендикулярну поверхню 21 червня дорівнювала  $0,70 \text{ кВт/м}^2$ , а 22 грудня –  $0,14 \text{ кВт/м}^2$ . Чому 22 грудня на перпендикулярну поверхню надходить менше прямої радіації, ніж 21 червня? У скільки разів змінилося надходження прямої

радіації на перпендикулярну і горизонтальну поверхню 22 грудня в порівнянні з її надходженням 21 червня?

**Задача 2.22.** Обчислити дійсну часову суму прямої радіації на горизонтальну поверхню, якщо за цей час середня висота Сонця  $30^\circ$ , а коефіцієнт ослаблення  $c = 0,25$ .

**Задача 2.23.** Висота Сонця і пряма радіація на перпендикулярну поверхню в Камінному Степу ( $52^\circ$  пн.ш.) 13 липня 1951 року:

Строк .....	5	7	9	11	13	15	17	19
$h_*$ .....	$7^\circ 30'$	$25^\circ 49'$	$43^\circ 23'$	$57^\circ 27'$	$59^\circ 15'$	$46^\circ 04'$	$27^\circ 38'$	$9^\circ 47'$
$I$ , кВт/м <sup>2</sup> ...	0,48	0,71	0,80	0,84	0,84	0,82	0,68	0,37

Обчислити для кожного строку пряму радіацію на горизонтальну поверхню. Визначивши час сходу і заходу Сонця, побудувати і проаналізувати графіки добового ходу  $I_\perp$  і  $I'$ . Обчислити дійсні добові суми цих величин. Як зміниться співвідношення сум в тому ж пункті в зимовий день або у вказаний день, але на інших широтах?

**Задача 2.24.** За Калініним Н.Н., середні дійсні місячні суми прямої радіації на перпендикулярну і горизонтальну поверхню в Павловську (Ленінградська область):

Місяць .....	II	IV	VI	VIII	X
XII					
$\sum_{\text{міс}} I_\perp$ , МДж/м <sup>2</sup> .....	112	394	594	450	137
31					
$\sum_{\text{міс}} I'$ , МДж/м <sup>2</sup> .....	26	184	341	228	3

Побудувати і проаналізувати графік річного ходу цих величин. Знайти їх річні суми. Обчислити відношення (%)  $\frac{\sum_{\text{міс}} I'}{\sum_{\text{міс}} I_\perp}$  для вказаних місяців.

Побудувати графік його річного ходу і проаналізувати.

### Домашнє завдання

**Задача 2.25.** Середні часові дійсні суми прямої радіації на перпендикулярну поверхню (МДж/м<sup>2</sup>) у Воєйково:

Місяць	Інтервал, год							
	0 - 1	3 - 4	6 - 7	9 - 10	12 - 13	15 - 16	18 - 19	21 - 22
Червень	0	0,21	1,17	1,51	1,38	1,30	0,84	0
Грудень	0	0	0	0,04	0,17	0	0	0

Побудувати і проаналізувати графік добового ходу. Обчислити дійсні добові суми. Як і чому відрізняється добовий хід прямої радіації в одному і тому ж пункті в різні місяці? Чим викликана різниця добових сум?

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці.

№ з/п	Пункт	місяць	Інтервал, год							
			0 - 1	3 - 4	6 - 7	9 - 10	12-13	15-16	18-19	21-22
1.	Іркутськ	VI	0	0,13	1,09	1,55	1,80	1,42	0,75	0
		XII	0	0	0,17	0,25	0,08	0	0	0
2.	Карадаг	I	0	0	0,42	0,59	0,84	0,42	0	0
		VII	0	0	1,55	2,26	2,14	1,84	0,80	0
3.	Владивосток	VI	0	0	0,38	0,80	1,09	0,88	0,33	0
		XII	0	0	0	1,80	2,09	0,21	0	0
4.	Тбілісі	VI	0	0	1,17	2,00	2,26	1,59	0,04	0
		XII	0	0	0	0,88	1,05	0,33	0	0
5.	Якутськ	V	0	0,13	1,00	1,30	1,26	1,00	0,59	0
		XI	0	0	0	0,25	0,75	0,08	0	0
6.	Воейково	I	0	0	0	0,13	0,29	0	0	0
		VII	0	0	0,96	1,30	1,42	1,26	0,75	0
7.	Іркутськ	I	0	0	0	0,54	1,09	0,29	0	0
		VII	0	0	0,88	1,55	1,76	1,47	0,67	0
8.	Карадаг	II	0	0	0,04	0,75	0,96	0,71	0	0
		VIII	0	0	1,30	2,30	2,22	1,84	0,33	0
9.	Владивосток	I	0	0	0,42	1,80	2,14	1,30	0	0
		VII	0	0	0,21	0,50	0,92	0,80	0,25	0
10.	Тбілісі	I	0	0	0	0,80	1,13	0,59	0	0
		VII	0	0	0,92	1,76	2,09	1,93	0,54	0
11.	Якутськ	IV	0	0	1,00	1,84	1,88	1,59	0,46	0
		X	0	0	0	0,63	0,84	0,50	0	0
12.	Воейково	II	0	0	0	0,50	0,75	0,33	0	0
		VIII	0	0	0,84	1,26	1,21	1,09	0,50	0
13.	Іркутськ	II	0	0	0	1,13	1,55	0,80	0	0
		VIII	0	0	0,75	1,51	1,84	1,42	0,38	0
14.	Карадаг	III	0	0	0,04	1,09	1,21	0,96	0	0
		IX	0	0	0,75	2,05	2,14	1,72	0	0
15.	Владивосток	II	0	0	0,38	2,01	2,30	1,51	0	0
		VIII	0	0	0,33	0,84	1,17	0,96	0,17	0
16.	Тбілісі	II	0	0	0	0,88	1,17	0,88	0	0
		VIII	0	0	0,59	1,67	2,09	1,67	0,21	0
17.	Воейково	III	0	0	0,17	1,09	1,34	0,96	0	0
		IX	0	0	0,25	0,75	0,92	0,80	0,04	0
18.	Іркутськ	III	0	0	0,29	1,72	1,83	1,47	0,04	0
		IX	0	0	0,42	1,38	1,76	1,26	0,08	0
19.	Карадаг	IV	0	0	0,59	1,42	1,72	1,38	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,42	1,63	1,09	0	0
20.	Владивосток	III	0	0	0,33	1,67	1,84	1,34	0	0
		IX	0	0	0,50	1,42	1,63	1,38	0,04	0
21.	Тбілісі	III	0	0	0,08	1,13	1,42	1,05	0	0
		IX	0	0	0,38	1,55	1,93	1,51	0	0

№ з/п	Пункт	місяць	Інтервал, год							
			0 - 1	3 - 4	6 - 7	9 - 10	12-13	15-16	18-19	21-22
22.	Іркутськ	IV	0	0	0,63	1,26	1,21	1,05	0,25	0
		X	0	0	0	0,33	0,50	0,29	0	0
23.	Карадаг	IV	0	0	0,84	1,72	1,84	1,42	0,21	0
		X	0	0	0,08	1,17	1,47	1,00	0	0
24.	Владивосток	IV	0	0	0,59	1,34	1,42	1,05	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,67	1,88	1,47	0	0
25.	Тбілісі	IV	0	0	0,54	1,51	1,76	1,34	0,08	0
		X	0	0	0,13	1,38	1,55	1,05	0	0
26.	Воейково	V	0	0,04	1,05	1,38	1,38	1,34	0,84	0
		XI	0	0	0	0,21	0,33	0,04	0	0
27.	Іркутськ	V	0	0	1,00	1,59	1,67	1,34	0,59	0
		XI	0	0	0	0,54	1,09	0,42	0	0
28.	Карадаг	V	0	0	1,05	1,76	1,93	1,67	0,54	0
		XI	0	0	0	0,80	1,13	0,71	0	0
29.	Владивосток	V	0	0	0,50	1,13	1,34	1,05	0,25	0
		XI	0	0	0	1,72	1,97	1,30	0	0
30.	Тбілісі	V	0	0	0,84	1,63	1,80	1,17	0,25	0
		XI	0	0	0	0,96	1,21	0,80	0	0

**Задача 2.26.** При висоті Сонця  $53^{\circ}29'$  та азимуті -  $20^{\circ}00'$  пряма радіація на перпендикулярну поверхню складає  $0,82 \text{ кВт/м}^2$ . Обчислити пряму радіацію на горизонтальну поверхню, а також на схили крутизною 30, 60 і  $90^{\circ}$  (вертикальна стіна), звернені на північ, південь, схід та захід. Проаналізуйте результати. Як вони змінюються при зміні висоти й азимуту Сонця.

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці.

№ з/п	$h_*$	$\psi_*$	$I_{\perp}, \text{ кВт/м}^2$	№ з/п	$h_*$	$\psi_*$	$I_{\perp}, \text{ кВт/м}^2$
1	$25^{\circ}01'$	$12^{\circ}59'$	0,22	16	$26^{\circ}45'$	$-96^{\circ}15'$	0,24
2	$35^{\circ}59'$	$-150^{\circ}01'$	0,42	17	$36^{\circ}17'$	$132^{\circ}43'$	0,44
3	$45^{\circ}03'$	$48^{\circ}47'$	0,62	18	$46^{\circ}43'$	$-60^{\circ}17'$	0,64
4	$27^{\circ}57'$	$-144^{\circ}03'$	0,26	19	$28^{\circ}19'$	$168^{\circ}41'$	0,28
5	$37^{\circ}05'$	$84^{\circ}55'$	0,46	20	$38^{\circ}41'$	$-24^{\circ}19'$	0,48
6	$47^{\circ}55'$	$-108^{\circ}05'$	0,66	21	$48^{\circ}21'$	$36^{\circ}39'$	0,68
7	$29^{\circ}07'$	$120^{\circ}53'$	0,30	22	$30^{\circ}39'$	$-156^{\circ}21'$	0,32
8	$39^{\circ}53'$	$-72^{\circ}07'$	0,50	23	$40^{\circ}23'$	$72^{\circ}37'$	0,52
9	$49^{\circ}09'$	$156^{\circ}51'$	0,70	24	$50^{\circ}37'$	$-120^{\circ}23'$	0,72
10	$31^{\circ}51'$	$-36^{\circ}09'$	0,34	25	$32^{\circ}25'$	$108^{\circ}35'$	0,36
11	$41^{\circ}11'$	$24^{\circ}49'$	0,54	26	$42^{\circ}35'$	$-84^{\circ}25'$	0,56
12	$51^{\circ}49'$	$-156^{\circ}11'$	0,74	27	$52^{\circ}27'$	$144^{\circ}33'$	0,76
13	$33^{\circ}13'$	$60^{\circ}47'$	0,38	28	$34^{\circ}33'$	$-48^{\circ}27'$	0,40
14	$43^{\circ}47'$	$-132^{\circ}13'$	0,58	29	$44^{\circ}29'$	$150^{\circ}31'$	0,60
15	$53^{\circ}15'$	$96^{\circ}45'$	0,78	30	$54^{\circ}31'$	$-12^{\circ}29'$	0,80

### ***Контрольні питання:***

1. Дайте поняття абсолютно чорного тіла.
2. Чому дорівнює сонячна стала ?
3. Дайте визначення прямої сонячної радіації.
4. На які області ділиться спектр випромінення Сонця ?
5. На яку ділянку спектра припадає максимум випромінювальної здатності Сонця ?
6. Дайте поняття сонячної сталої.
7. Від чого залежить коефіцієнт прозорості ?
8. Дайте поняття ідеальної атмосфери.
9. Що являє собою фактор каламутності ?
10. Яким може бути розсіювання сонячної радіації в атмосфері ?
11. Чи залежить оптична маса атмосфери від висоти Сонця і як ?

### Практичне заняття № 3

## РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ТУРБУЛЕНТНОСТІ

*Мета заняття* – вміти розраховувати коефіцієнт турбулентності різними методами.

### Теоретична частина

#### 3.1 Методи визначення коефіцієнта турбулентності.

Коефіцієнт турбулентності  $K$  виражається в м<sup>2</sup>/с з точністю до сотих. При визначенні турбулентних потоків у приземному шарі атмосфери використовується коефіцієнт турбулентності  $K_1$  на висоті 1 м, яка позначається  $z'$ . По теорії Будико М.І., в межах приземного шару

$$K = \frac{K_1 z}{z'},$$

де  $z$  – висота (м).

Для визначення  $K_1$  на суші найбільш розповсюджені такі методи.

*Метод теплового балансу.* Згідно цього метода

$$K_1 = \alpha (B - P), \quad (3.1)$$

де  $B$  – радіаційний баланс діяльного шару, кВт/м<sup>2</sup>;

$P$  – поверхнева щільність теплового потоку в ґрунті, кВт/м<sup>2</sup>;

$\alpha$  – коефіцієнт, що визначається за формулою

$$\alpha = \frac{1,07}{\Delta t + 1,56 \Delta e} \quad (3.2)$$

і виражається в м<sup>4</sup>/кДж;  $\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}$  ( $t_{0,5}$  і  $t_{2,0}$  – температура повітря в °С на стандартних рівнях градієнтних спостережень 0,5 і 2,0 м);  $\Delta e = e_{0,5} - e_{2,0}$  ( $e_{0,5}$  і  $e_{2,0}$  – парціальний тиск водяної пари (гПа) на тих же рівнях). Якщо температура повітря або парціальний тиск водяної пари виміряні не на стандартних рівнях 0,5 і 2,0 м, а на деяких інших рівнях  $z_1$  і  $z_2$ , то від різниць  $t_{z_1} - t_{z_2}$  і  $e_{z_1} - e_{z_2}$  потрібно перейти до  $\Delta t$  і  $\Delta e$  за співвідношеннями

$$\Delta t = \frac{0,602}{\lg \frac{z_2}{z_1}} (t_{z_1} - t_{z_2}); \quad \Delta e = \frac{0,602}{\lg \frac{z_2}{z_1}} (e_{z_1} - e_{z_2}).$$

Формулу (3.1) потрібно застосовувати тільки при

$$(B - P) \geq 0,14 \text{ кВт/м}^2; \Delta t \geq 0,3^\circ\text{C}; \Delta e \geq 0,3 \text{ гПа.} \quad (3.3)$$

*Станційний метод турбулентної дифузії.* Якщо умови (3.3) не виконуються, то для визначення  $K_1$  використовується метод турбулентної дифузії, розроблений Будико М.І. і впроваджений у станційну практику Дубровіним Л.В. Для знаходження  $K_1$  цим методом необхідно з градієнтних спостережень температури ( $t$ ) і швидкості вітру ( $u$ ) на стандартних рівнях отримати величини

$$\Delta t = t_{0,5} - t_{2,0}; \Delta u = u_{2,0} - u_{0,5},$$

причому метод використовується тільки при  $\Delta u \geq 0,3 \text{ м/с}$ .

За відомими  $\Delta t$  і  $\Delta u$  значення  $K_1$  знаходиться з табл. Дубровіна (додаток 7).

*Уточнений метод турбулентної дифузії (метод тангенсів).* Цей метод використовується, коли є результати градієнтних спостережень більше ніж на двох рівнях. За цим методом

$$K_1 = 0,144 \operatorname{tg} \alpha \left( 1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right) z', \quad (3.4)$$

де

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{du}{d \ln z}, \operatorname{tg} \beta = \frac{dt}{d \ln z}. \quad (3.5)$$

Останні величини знаходяться графічно (задача 3.4), причому  $\operatorname{tg} \alpha > 0$  завжди;  $\operatorname{tg} \beta > 0$  при інверсії, а при зменшенні температури з висотою  $\operatorname{tg} \beta < 0$ .

Формула (3.4) зберігає зміст тільки при  $\frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \leq 1$ .

*Формула Тимофєєва М.П.* Згідно цієї формули

$$K_1 = \frac{0,16 u_{1,0}}{\ln \left( \frac{z'}{z_{00}} \right)} \left( 1 + 7,5 \frac{\Delta t}{u_{1,0}^2} \right) z', \quad (3.6)$$

де  $u_{1,0}$  – швидкість вітру (м/с) на висоті 1 м;

$z_{00}$  – параметр шорсткості при рівноважних умовах.



Значення  $z_{00}$  визначається за графіком  $(u, \ln z)$ , на який наноситься швидкість вітру на декількох рівнях. Якщо швидкість вітру виміряна тільки на двох рівнях  $z_1$  і  $z_2$ , то  $z_{00}$  знаходять із співвідношення

$$\lg \frac{z_{00}}{z'} = \frac{\lg z_2 - \left(\frac{u_2}{u_1}\right) \lg z_1}{1 - \frac{u_2}{u_1}} \quad (3.7)$$

Якщо швидкість вітру виміряна тільки на рівні 1 м, то наближені значення  $z_{00}$  знаходяться з таблиці

Вид поверхні	$z_{00}$ , см	Вид поверхні	$z_{00}$ , см
Трава:		Пухкий ґрунт без покриву	2
- висота < 6 см	1	Рівний глибокий сніг з щільною поверхнею	0,5
- висота 6 – 15 см	2	Нерівний сніг середньої глибини	1
- висота 16 – 25 см	3	Пухкий і неглибокий сніг	2
- висота 26 – 35 см	4		
Щільний ґрунт без покриву	1		

**Задача 3.1.** При спостереженнях під Санкт-Петербургом в 12 год 9 серпня отримано: радіаційний баланс  $0,70 \text{ кВт/м}^2$ ; поверхнева щільність теплового потоку в ґрунті  $0,05 \text{ кВт/м}^2$ ; температура повітря і парціальний тиск водяної пари на висотах 0,5 і 2, 0 м відповідно  $19,6$  і  $18,6^\circ\text{C}$ ,  $14,8$  і  $13,6 \text{ гПа}$ . Знайти коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м.

**Задача 3.2.** На метеоплощадці отримано:  $t_{0,5} = 14,6^\circ\text{C}$ ,  $t_{2,0} = 13,8^\circ\text{C}$ ;  $u_{0,5} = 1,8 \text{ м/с}$ ;  $u_{2,0} = 2,8 \text{ м/с}$ . Знайти коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м.

**Задача 3.3.** На північному заході країни 11 липня 1964 року в 11 год отримано:  $t_{0,2} = 19,9^\circ\text{C}$ ;  $t_{1,0} = 19,2^\circ\text{C}$ ;  $u_{0,2} = 1,3 \text{ м/с}$ ;  $u_{2,0} = 1,8 \text{ м/с}$ . Знайти коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м.

**Задача 3.4.** При градієнтних спостереженнях на рівнях 0,2; 0,5; 1,0 і 2,0 м отримані значення температури  $31,5$ ;  $30,5$ ;  $29,4$  і  $28,6^\circ\text{C}$  та швидкості вітру  $2,1$ ;  $3,5$ ;  $4,5$  і  $5,3 \text{ м/с}$ . Знайти коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м уточненим та станційним методами турбулентної дифузії. Який з отриманих результатів переважний і чому? Визначити відносну похибку другої відповіді.

**Розв'язання.** Побудувати два графіки тангенсів. На осях ординат відкласти значення  $\ln z$  від  $-1,6$  до  $1,0$  в масштабі  $1 \text{ см} = 0,2$ . Осі абсцис провести при значенні  $\ln z = 0,00$ . На першому графіку на осі абсцис відкласти швидкість вітру від  $2$  до  $6 \text{ м/с}$  в масштабі  $3 \text{ см} = 1 \text{ м/с}$ , на другому – температуру від  $28,0$  до  $32,0^\circ\text{C}$  в масштабі  $3 \text{ см} = 1,0^\circ\text{C}$ .

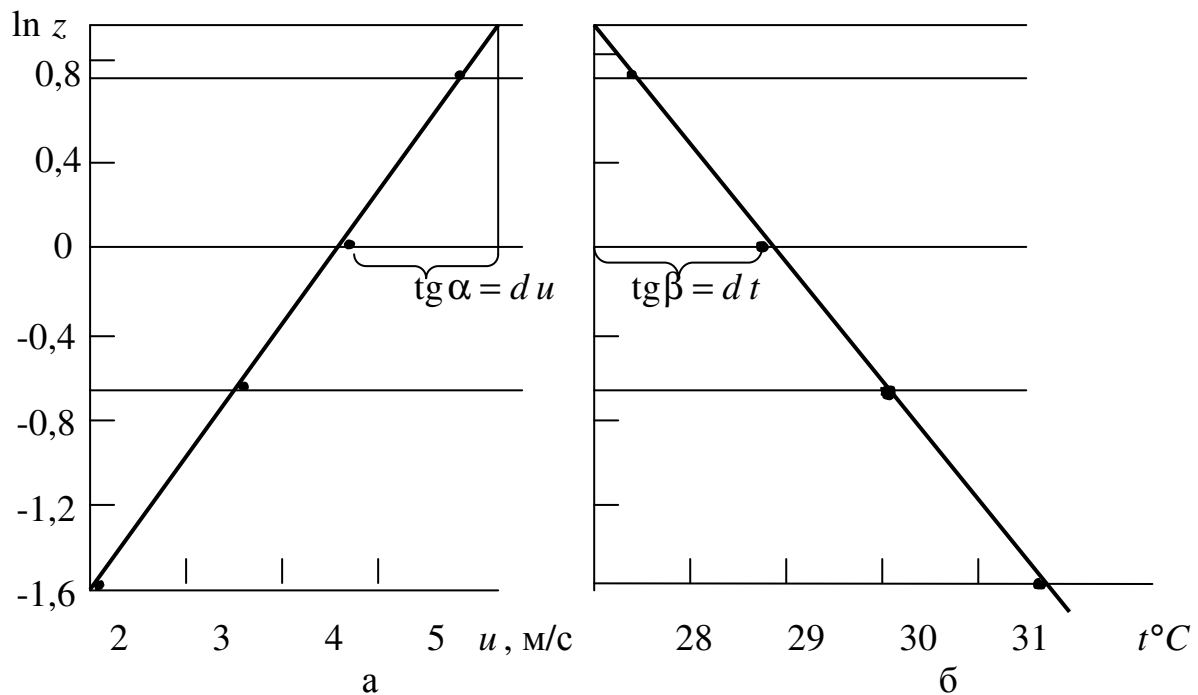


Рисунок 3.1 – Графіки тангенсів: а – визначення  $\operatorname{tg} \alpha$ , б – визначення  $\operatorname{tg} \beta$ .

Обчислити натуральні логарифми вказаних висот і провести відповідні їм ізолінії, паралельні осі абсцис. Нанести на них виміряні значення  $t$  і  $u$ . За чотирма точками на кожному графіку провести пряму так, щоб сума відстаней від точок до прямої за перпендикуляром була б приблизно однакова як ліворуч, так і праворуч. Точки повинні розташовуватися ліворуч і праворуч від прямої або через одну, або дві крайні – по одну сторону, а дві – по іншу. Продовжити пряму вгору до перетину з лінією  $\ln z = 1,0$ . З точки перетину опустити перпендикуляр на вісь абсцис. Відстань від його основи до точки перетину осі абсцис з побудованою прямою, виражене у відповідних одиницях (згідно масштабу на осі абсцис), на першому графіку є  $\operatorname{tg} \alpha$ , а на другому –  $\operatorname{tg} \beta$ . У даному випадку  $\operatorname{tg} \alpha = 5,75 - 4,38 = 1,37$  м/с;  $\operatorname{tg} \beta = 28,13 - 29,47 = -1,34^\circ\text{C}$ . Тоді за формулою (3.4)  $K_1 = 0,34$  м<sup>2</sup>/с. Використовуючи значення на стандартних висотах 0,5 і 2,0 м, знайдемо  $\Delta t = 1,9^\circ\text{C}$  і  $\Delta u = 1,8$  м/с, звідки  $K_1 = 0,27$  м<sup>2</sup>/с (за Дубровіним). Відносна похибка цього значення в порівнянні із знайденим уточненим методом дорівнює 21%.

**Примітка.** Масштаби, вказані для осей абсцис, відносяться тільки до даної задачі. Їх потрібно кожний раз підбирати так, щоб кут між прямою і віссю абсцис не дуже відрізнявся від 45 або 135°.

**Задача 3.5.** Швидкість вітру над пухким ґрунтом в районі Воронежа в середньому за липень 1951 року на висотах 0,6; 1,1; 2,0 і 11,5 м складала 4,4;

5,7; 6,9 і 8,1 м/с. Визначити параметр шорсткості графічно і за формулою (7). Яку із відповідей і чому можна вважати більш достовірною ?

**Примітка.** На осі абсцис відкласти швидкість вітру починаючи з 0 м/с, а на осі ординат – значення  $\ln z$ . Пряму, побудовану за точками так, як описано в розв'язанні задачі 3.3, продовжити вниз до перетину з віссю ординат. При  $u = 0,0$  зняти значення  $\ln z_{00}$ , яке знаходиться між віссю абсцис і точкою перетину. За  $\ln z_{00}$  знайти  $z_{00}$  в метрах і перевести в сантиметри. При обчисленні  $z_{00}$  за формулою (3.7) використовувати значення швидкості вітру на двох крайніх висотах.

**Задача 3.6.** Використовуючи першу з відповідей з попередньої задачі, знайти  $K_1$  за формулою Тимофєєва М.П., якщо на тій же площадці 2 липня в 14 годин було отримано:  $t_{0,5} = 21,7^\circ\text{C}$ ;  $t_{2,0} = 20,1^\circ\text{C}$ ;  $u_{1,0} = 4,1$  м/с. В яку сторону і чому зміниться відповідь, якщо при інших невідомих умовах на площадці утворюється високий трав'яний покрив ? А якщо збільшиться (зменшиться) різниця температур ?

**Задача 3.7.** Знайти коефіцієнт турбулентності на висотах 10 м і 100 м, якщо на висоті 1 м він дорівнює  $0,20 \text{ м}^2/\text{с}$ .

### 3.2 Фактори турбулентності

Співвідношення між термічними і динамічними факторами турбулентності зручно аналізувати, наприклад, виходячи з формули Будико М. І.

$$K_1 = 0,104 \Delta u z' + 0,144 \frac{\Delta t}{\Delta u} z' . \quad (3.8)$$

У формулі (3.8) перша складова відображає вплив динамічних причин розвитку турбулентності (її можна назвати динамічним фактором (Д), а друга – відносну роль термічних причин (її можна умовно назвати термічним фактором (Т)).

**Задача 3.8.** В 17 годин 8 липня 1964 року на площадці ЛГМІ в Даймищі (Ленінградська область) було отримано:  $t_{0,5} = 13,6^\circ\text{C}$ ;  $t_{2,0} = 13,4^\circ\text{C}$ ;  $u_{0,5} = 1,8$  м/с;  $u_{2,0} = 2,7$  м/с. Знайти фактори турбулентності на висоті 1 м і установити, який з них був переважним. Які знаки можуть мати динамічний і термічний фактори турбулентності ?

**Задача 3.10.** В 15 годин 13 липня 1964 року на площадці ЛГМІ в Даймищі було отримано:  $t_{0,5} = 25,5^\circ\text{C}$ ;  $t_{2,0} = 24,9^\circ\text{C}$ ;  $u_{0,5} = 0,4$  м/с;  $u_{2,0} = 0,6$  м/с. Знайти фактори турбулентності на висоті 1 м і установити, який з них переважний.

**Задача 3.11.** Знайти динамічний і термічний фактори та їх суму, якщо:

а)  $\Delta u = 1,0$  м/с,  $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$ ;

б)  $\Delta u = 1,0$  м/с,  $\Delta t = 0,0^\circ\text{C}$ ;

в)  $\Delta u = 1,0$  м/с,  $\Delta t = -0,5^\circ\text{C}$ .

Як впливає термічна стратифікація приземного шару атмосфери на інтенсивність турбулентного перемішування у цьому шарі ?

### Домашнє завдання

**Задача 3.12.** Обчислити коефіцієнт турбулентності на висоті 1 м методом теплового балансу, станційним і уточненим методами турбулентної дифузії, використовуючи результати градієнтних спостережень на висотах 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 м; температура 22,8; 22,0; 21,6; 21,1 $^\circ\text{C}$ ; парціальний тиск водяної пари 16,4; 16,1; 15,7; 15,6 гПа; швидкість вітру 1,7; 2,2; 2,8; 3,2 м/с. Радіаційний баланс складає 0,49 кВт/м<sup>2</sup>, поверхнева щільність теплового потоку у ґрунті 0,06 кВт/м<sup>2</sup>. Визначити похибку другого та третього результатів відносно першого.

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці.

№ з/п	$B$ , кВт/м <sup>2</sup>	$P$ , кВт/м <sup>2</sup>	$t_{0,2}$ °C	$t_{0,5}$ °C	$t_{1,0}$ °C	$t_{2,0}$ °C	$e_{0,2}$ гПа	$e_{0,5}$ гПа	$e_{1,0}$ гПа	$e_{2,0}$ гПа
1	0,55	0,08	20,6	20,4	19,9	19,8	9,4	8,9	8,4	8,0
2	0,49	0,05	17,3	17,0	16,7	16,4	11,3	10,8	10,2	10,0
3	0,59	0,06	17,0	16,9	16,6	16,2	12,6	12,4	12,2	11,2
4	0,29	0,03	18,0	17,5	17,2	17,0	11,8	11,6	11,5	11,1
5	0,49	0,04	16,1	15,8	15,5	15,3	10,5	9,6	9,5	8,7
6	0,52	0,06	19,4	18,9	18,6	18,3	18,9	18,3	17,4	17,2
7	0,45	0,08	27,9	27,2	26,9	26,4	16,9	16,2	16,1	15,9
8	0,28	0,05	24,7	24,5	24,3	23,9	20,1	19,3	18,9	18,7
9	0,46	0,08	22,1	21,9	21,6	21,4	11,4	11,1	10,2	10,1
10	0,45	0,06	23,7	23,5	23,2	23,0	12,1	11,7	11,1	10,9
11	0,41	0,08	22,5	22,1	21,8	21,7	18,2	17,0	16,7	16,4
12	0,54	0,08	21,6	21,1	20,8	20,7	13,0	12,4	12,1	11,6
13	0,30	0,04	18,9	18,5	18,4	18,0	14,2	14,0	13,9	13,7
14	0,21	0,04	17,4	17,2	16,8	16,6	13,4	13,2	13,0	12,9
15	0,46	0,07	17,3	16,8	16,4	16,2	16,8	16,3	16,1	15,7
16	0,50	0,10	18,6	18,2	17,9	17,8	13,6	13,0	12,2	11,8
17	0,52	0,08	21,8	21,3	20,6	20,2	19,1	18,8	18,7	18,4
18	0,45	0,09	20,4	20,1	19,6	19,5	11,0	10,4	10,3	9,9
19	0,31	0,07	21,0	20,6	20,4	20,1	18,6	18,3	17,9	17,6
20	0,44	0,04	17,0	16,3	15,7	15,5	10,8	10,4	10,3	10,0
21	0,30	0,03	21,7	21,2	20,9	20,7	10,1	9,9	9,9	9,6
22	0,52	0,08	22,0	21,2	20,8	20,6	10,3	9,9	9,6	9,4
23	0,49	0,06	15,9	15,2	14,9	14,6	11,8	11,6	11,2	11,0

24	0,31	0,01	18,5	18,2	18,1	17,8	10,7	10,3	9,6	9,4
25	0,40	0,04	20,7	20,6	20,3	19,8	10,4	10,1	9,8	9,6
26	0,38	0,06	20,0	19,7	19,4	19,1	11,7	11,3	10,9	10,5
27	0,45	0,08	19,7	19,2	19,0	18,8	11,6	11,2	10,6	10,2
28	0,17	0,03	16,1	15,8	15,6	15,5	15,2	14,8	14,6	14,3
29	0,36	0,05	15,5	15,3	15,0	14,8	14,4	13,7	13,3	12,7
30	0,48	0,09	19,2	18,9	18,6	18,2	17,9	17,1	16,6	16,1

№ з/п	$u_{0,2}$ , м/с	$u_{0,5}$ , м/с	$u_{1,0}$ , м/с	$u_{2,0}$ , м/с
1	1,7	2,3	2,5	3,0
2	0,3	0,7	1,1	1,6
3	2,2	2,6	2,9	3,2
4	1,0	1,2	1,4	1,7
5	1,9	2,2	2,4	2,7
6	0,4	0,8	1,0	1,3
7	1,1	1,4	1,7	1,9
8	2,0	2,7	3,0	3,5
9	0,7	0,9	1,2	1,6
10	1,1	1,5	1,6	1,9
11	1,4	1,6	1,8	2,1
12	1,3	1,6	1,7	1,9
13	1,3	1,4	1,5	1,8
14	1,1	1,7	2,2	2,4
15	0,9	1,1	1,3	1,6
16	1,1	1,7	2,1	2,3
17	0,4	0,9	1,4	1,7
18	1,3	1,8	2,0	2,1
19	1,3	1,7	2,0	2,2
20	0,6	1,0	1,5	1,7
21	1,0	1,3	1,4	1,6
22	1,3	1,8	2,0	2,2
23	1,4	1,7	1,8	2,1
24	0,6	0,9	1,0	1,2
25	1,2	1,4	1,6	1,9
26	0,7	1,0	1,3	1,5
27	1,3	1,5	1,8	2,1
28	1,3	1,7	2,2	2,4
29	0,3	0,9	1,2	1,5
30	1,2	1,6	2,3	2,5

**Задача 3.13.** Використовуючи результати градієнтних спостережень на ст. Воейково за 23 липня 1966 рік, обчислити динамічний і термічний фактори та їх суму на висоті 1 м у всі строки спостережень. Побудувати і проаналізувати графік добового ходу всіх трьох величин.

Строк, год	$t_{0,5}$	$t_{2,0}$	$u_{0,5}$	$u_{2,0}$
1	9,5	9,6	1,8	2,4
7	11,2	11,2	2,6	3,3
10	13,0	12,8	3,4	4,2
13	13,3	13,2	4,2	5,4
16	12,7	12,7	4,0	5,0
19	12,2	12,3	5,4	6,7
1 (наступна доба)	10,6	10,8	2,4	3,0

### ***Вказівки.***

1. На осі абсцис відкласти години від 0 до 24 в масштабі 1 см = 2 год. На осі ординат відкласти значення від - 0,04 до 0,16 м<sup>2</sup>/с в масштабі 1 см = 0,02 м<sup>2</sup>/с. Нанести потрібні точки, з'єднати їх відрізками прямих різного виду або кольору і отримати три ламані лінії, кожна з яких повинна починатися в 0 год і закінчуватися у 24 год. На графіку надписати його назву, час і місце спостереження.

2. Аналіз виконати письмово, послідовно розглядаючи інтервали 0 – 7, 7 – 10, ....., 19 – 24 год. При аналізі кожного інтервалу висвітлити два питання: 1) природа турбулентності (який фактор вносить основний внесок, і як впливає на турбулентність другий фактор?); 2) характер і причини зміни інтенсивності турбулентності (під впливом якого фактора змінювалася їх сума і яку роль при цьому відігравав другий фактор?).

### ***Приклад аналізу до задачі 3.13.***

0 – 7 годин. Турбулентність в основному мала динамічне походження. Термічний фактор був від'ємним і послаблював дію динамічного. Турбулентність підсилювалася, через те що зростали обидва фактори.

7 – 10 годин. Турбулентність в 7 годин мала чисто динамічне походження, а потім переважно динамічне. Термічний фактор після 7 години став додатним і підсилював дію динамічного. Турбулентність продовжувала підсилюватися в результаті зростання обох факторів.

10 – 13 годин. Турбулентність продовжувала бути в основному динамічною, а термічний фактор був додатним і підсилював дію динамічного. Підсилення турбулентності продовжувалося, але вже тільки за рахунок росту динамічного фактора, тоді як термічний фактор зменшувався, в результаті чого розвиток турбулентності сповільнювався.

Варіанти вихідних даних для домашнього завдання взяти з таблиці

№ з/п	Дата	Строк, год.	$t_{0,5}$	$t_{2,0}$	$\mu_{0,5}$	$\mu_{2,0}$	№ з/п	Дата	Строк, год.	$t_{0,5}$	$t_{2,0}$	$\mu_{0,5}$	$\mu_{2,0}$
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
1	3.06	1	5,7	6,0	1,8	2,6	4	9.07	1	11,013,	11,2	1,0	1,6
		7	10,6	10,4	2,2	3,1			4	13,3	1,2	1,6	
		10	14,1	13,8	2,4	3,3			10	16,6	2,1	3,0	
		13	17,1	16,6	1,7	3,9			13	19,9	1,2	1,8	
		16	17,6	17,6	5,0	5,8			16	16,617,	1,9	2,6	
19	14,9	14,8	5,1	6,7	19	1	1,2	1,7					
1*	7,7	7,8	1,9	3,1	1*	9,8	0,8	1,4					
2	5.06	1	10,3	10,4	1,5	1,9	5	17.08	1	17,2	17,7	0,0	1,8
		7	9,6	9,5	1,4	1,7			7	20,1	1,7	3,2	
		10	14,3	13,7	1,8	2,3			10	24,6	2,6	3,7	
		13	15,2	14,8	2,6	3,3			13	27,6	2,6	3,7	
		16	13,5	13,6	3,0	4,3			16	27,8	2,2	3,6	
19	11,0	11,2	2,3	3,3	19	24,6	0,4	1,4					
1*	10,2	10,2	2,6	3,5	1*	17,3	1,0	1,9					
3	7.06	1	9,4	9,5	0,9	1,6	6	18.07	1	17,3	17,7	1,0	1,9
		7	10,7	10,5	3,5	4,7			7	20,5	1,5	2,1	
		10	13,4	13,0	4,5	5,8			10	25,5	1,8	2,9	
		13	16,1	14,8	4,1	5,5			13	26,1	2,4	4,5	
		16	12,7	12,0	1,7	2,4			16	27,0	0,6	1,9	
19	11,9	11,9	3,4	4,4	19	22,1	1,8	3,3					
1*	8,0	8,1	2,0	2,8	1*	18,2	1,2	2,2					

1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
7	22.07	10	23,2	23,0	0,9	2,8	11	9.08	10	12,7	12,7	1,9	3,6
		13	28,3	27,3	2,3	4,8			13	15,8	15,0	1,5	2,0
		16	27,4	27,4	1,2	3,3			16	13,3	12,8	0,3	0,6
		19	19,2	19,3	0,0	1,6			19	12,6	12,3	0,1	0,6
		1*	17,2	17,4	0,0	1,1			1*	6,5	7,2	0,1	1,2
8	1.08	10	19,2	19,1	0,9	1,5	12	9.08	10	8,9	8,5	1,0	1,3
		13	23,5	23,4	1,5	3,1			13	10,9	9,9	1,9	2,8
		16	21,4	21,4	0,8	1,7			16	10,2	9,8	0,4	0,8
		19	18,1	18,3	1,2	1,9			19	7,3	7,1	1,5	2,2
		1*	15,7	15,9	0,6	1,2			1*	3,8	3,7	1,5	2,2
9	2.08	10	20,5	20,3	0,5	1,6	13	15.05	10	11,3	10,5	2,5	3,6
		13	17,0	16,0	1,2	2,2			13	12,6	11,9	1,5	2,0
		16	19,6	19,5	2,1	2,9			16	13,8	13,3	0,9	1,3
		19	18,1	18,0	0,0	0,5			19	10,1	10,1	2,8	4,1
		1*	14,5	14,8	0,3	1,1			1*	7,4	7,5	1,7	2,7
10	6.08	10	19,0	18,8	1,9	2,6	14	27.05	10	27,9	27,6	3,0	4,2
		13	19,8	19,6	2,3	3,3			13	30,4	30,3	4,2	6,0
		16	17,0	16,8	1,9	2,7			16	29,2	29,0	2,5	3,8
		19	16,0	16,0	0,9	1,7			19	20,4	20,8	1,2	2,4
		1	13,5	13,6	1,4	2,3			1	20,5	21,2	3,4	4,9
		7	15,7	15,7	1,7	2,5			7	21,5	21,6	2,9	4,3



1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
15	8.06	10	11,2	11,0	0,8	1,1	19	1.07	10	19,7	19,4	2,9	4,2
		13	11,6	11,1	2,2	2,6			13	21,7	21,2	3,7	5,2
		16	12,8	12,1	2,3	3,6			16	23,9	23,9	3,7	5,2
		19	11,0	10,8	1,9	3,1			19	21,4	21,7	2,7	3,8
		1*	8,0	8,3	2,2	3,4			1*	15,6	15,9	1,2	1,9
16	13.06	10	12,5	12,1	3,8	5,1	20	2.07	10	21,8	21,7	1,9	3,0
		13	13,4	13,1	3,3	5,5			13	22,9	22,7	2,1	3,5
		16	14,3	13,7	2,8	3,8			16	21,5	21,5	3,0	4,4
		19	12,4	12,1	1,9	3,3			19	18,6	19,0	2,8	4,1
		1*	6,9	7,4	0,8	2,0			1*	14,4	14,5	1,0	1,6
17	15.06	10	9,3	8,6	3,0	4,2	21	3.07	10	19,8	19,4	1,9	2,7
		13	9,5	9,0	2,7	4,5			13	21,5	21,0	1,4	2,8
		16	9,4	9,1	2,0	3,1			16	21,1	20,9	1,3	1,6
		19	10,0	9,9	2,0	3,2			19	19,5	19,4	1,0	1,6
		1*	4,8	5,3	0,9	1,9			1*	13,5	13,6	0,0	0,5
18	26.06	10	21,0	20,6	0,3	1,9	22	12.07	10	15,5	15,3	3,3	5,0
		13	22,7	22,5	2,6	4,0			13	17,1	16,8	3,1	5,5
		16	22,5	22,1	2,0	3,2			16	18,5	18,1	2,6	4,3
		19	20,4	20,5	2,1	2,8			19	15,8	15,9	1,8	2,7
		1	13,0	13,1	2,4	3,3			1	7,6	8,5	0,0	1,2
		7	17,5	17,2	0,4	0,7			7	12,8	12,9	1,9	2,8

1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
23	13.07	1 7 10 13 16 19 1*	9,1 12,9 19,0 21,3 21,1 18,0 13,3	9,4 12,8 18,3 20,5 20,7 18,1 13,7	1,2 1,7 1,8 1,9 1,7 0,1 0,0	2,1 2,5 2,6 2,7 2,8 1,1 1,2	27	17.09	1 7 10 13 16 19 1*	3,5 4,3 7,0 7,8 8,2 5,4 3,0	3,6 4,3 6,9 7,5 8,0 5,9 3,1	0,0 0,1 1,4 0,6 0,9 1,6 1,4	0,5 0,5 1,7 1,4 1,7 2,7 1,8
24	30.07	1 7 10 13 16 19 1*	16,9 19,0 23,1 24,8 25,5 22,4 13,3	17,8 19,3 22,7 24,3 25,0 22,4 13,4	0,0 0,0 1,4 0,4 1,2 0,0 0,0	1,2 1,2 2,5 1,5 1,9 1,5 0,8	28	18.09	1 7 10 13 16 19 1*	3,0 8,7 12,4 12,0 12,5 12,1 11,8	3,1 8,8 12,2 11,9 12,2 12,2 11,8	1,4 1,6 4,0 3,6 3,8 3,3 2,2	1,8 2,7 5,2 5,5 4,2 4,5 2,5
25	2.08	1 7 10 13 16 19 1*	12,7 14,6 17,9 20,1 19,9 17,9 15,9	12,8 14,7 17,3 19,5 19,4 17,9 16,0	1,6 2,4 1,6 2,0 1,6 1,1 2,0	2,3 4,1 3,4 4,4 2,8 2,6 3,7	29	5.10	1 7 10 13 16 19 1*	8,2 7,7 10,7 14,3 12,6 10,0 10,3	8,2 7,5 10,4 14,0 12,4 9,8 10,4	0,6 1,5 1,6 2,2 1,0 1,7 1,3	1,0 2,4 2,1 3,1 1,8 2,4 1,8
26	9.09	1 7 10 13 16 19 1*	10,6 9,3 9,8 11,6 11,4 9,2 6,6	10,8 9,0 9,2 11,1 11,1 9,2 6,8	2,2 1,2 2,4 2,4 2,8 0,9 0,8	3,4 2,4 3,5 4,5 4,1 1,5 1,4	30	7.10	1 7 10 13 16 19 1*	11,7 8,2 10,1 12,4 13,0 10,3 9,7	11,7 8,0 9,8 12,3 12,9 10,3 9,9	2,3 1,4 1,7 1,3 1,6 1,3 1,8	3,1 1,9 2,4 2,8 2,1 1,9 2,6

***Контрольні питання :***

1. Дайте поняття турбулентності.
2. Від чого залежить коефіцієнт турбулентності?
3. Як змінюється коефіцієнт турбулентності з висотою?
4. Чи впливає швидкість вітру на коефіцієнт турбулентності?
5. Дайте поняття числа Рейнольдса.
6. Які бувають види руху атмосфери?
7. Одиниця вимірювання коефіцієнта турбулентності.

## Практичне заняття № 4

### ТЕПЛОВИЙ РЕЖИМ ГРУНТУ

*Мета заняття* – знати закони поширення коливань температури в ґрунті, а також уміти розраховувати теплопровідність та температуропровідність ґрунту.

#### Теоретична частина

##### 4.1 Теплофізичні характеристики ґрунту

**Теплопровідність**  $\lambda$  виражається в Вт/(м·К) з точністю до десятих, а при дуже малих значеннях – з точністю до тисячних. Приблизні значення  $\lambda$  деяких ґрунтів, води і повітря складають:

- *граніт* ..... 4,2
- *глина волога* ..... 2,1
- *пісок сухий* ..... 1,0
- *нерухома вода* ..... 0,5
- *нерухоме повітря* ..... 0,023.

Теплопровідність снігового покриву розраховується за формулою Абельса  $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-6} \rho^2$ , де  $\rho$  - густина снігу (кг/м<sup>3</sup>).

Звичайно  $\lambda$  не визначається безпосередньо, а розраховується через інші характеристики.

**Питома теплоємність**  $c_{\text{пит}}$  виражається в кДж/(кг·К) з точністю до сотих. Приблизні значення  $c_{\text{пит}}$  для сухої частини деяких ґрунтів:

- *торф* ..... 2,18
- *гумус* ..... 1,84
- *чорнозем суглинний* ..... 1,26
- *чорнозем супіщаний*..... 1,09
- *глина* ..... 0,92
- *суглинок* ..... 0,84
- *пісок* ..... 0,80
- *солончаки* ..... 0,59

Значення питомої теплоємності води та повітря при постійному тиску складає відповідно 4,19 і 1,005 кДж/(кг·К).

**Об'ємна теплоємність**  $c$  виражається в МДж/(м<sup>3</sup>·К) з точністю до сотих. Для сухого ґрунту  $c_c = c_{\text{пит}} \cdot \rho$ , де  $\rho$  - густина; для вологого ґрунту

$$c_B = (c_{\text{пит.с}} + c_{\text{пит.в}} \omega) \rho, \quad (4.1)$$

де  $c_{\text{пит.с}}$  – питома теплоємність і густина сухої частини ґрунту;

$c_{\text{пит.в}}$  – питома теплоємність води;

$\omega$  – вологість ґрунту;

тобто відношення маси води в якомусь об'ємі ґрунту до маси сухої її частини у тому самому об'ємі (виражається в частках одиниці).

Для визначення  $\omega$  і  $\rho$  береться проба ґрунту, що має певний об'єм  $V$ . Вона зважується, а потім ретельно просушується і вторинно зважується. Якщо вага ( $H$ ) до просушування складала  $F_1$ , а після просушування стала  $F_2$ , то

$$\omega = \frac{F_1 - F_2}{F_2}, \quad \rho = \frac{F_2}{V g}.$$

Середня об'ємна теплоємність деяких ґрунтів  $c_{\text{ср}}$  приблизно складає:

Характеристика вологості ґрунту	$c_{\text{ср}}$ , МДж/(м <sup>3</sup> ·К)		
	Пісок	Глина	Гумус
Абсолютно сухий	1,21	0,96	0,67
Сухий	1,55	1,17	0,75
Слабко зволожений	1,84	1,42	0,84
Вологий	2,18	1,63	0,92
Сильно зволожений	2,47	1,84	1,00

Об'ємна теплоємність води складає 4,19 МДж/(м<sup>3</sup>·К), об'ємна теплоємність повітря при постійному тиску і нормальних умовах  $1,30 \cdot 10^{-3}$  МДж/(м<sup>3</sup>·К).

**Температуропровідність**  $a$  виражається в м<sup>2</sup>/с. В метеорології її частіше за все виражають в см<sup>2</sup>/год з точністю до сотих, причому  $1 \text{ см}^2/\text{год} = 1 \text{ см}^2/\text{год} = 2,8 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ . Наближено температуропровідність визначається:

1) за зменшенням амплітуди коливань температури ґрунту або водойми з глибиною:

$$a = \frac{0,6 (z_2 - z_1)^2}{T \left( \lg \frac{A_2}{A_1} \right)^2}, \quad (4.2)$$

де  $a$  – температуропровідність шару від  $z_1$  до  $z_2$ ;

$T$  – період коливань;

$A_1$  і  $A_2$  – амплітуди на вказаних глибинах;

2) із запізнення певної фази коливань, наприклад, максимуму, на глибині  $z_2$  в порівнянні з моментом її появи на глибині  $z_1$ :

$$a = \frac{T}{12,56} \cdot \frac{(z_2 - z_1)^2}{(\Delta\tau)^2}, \quad (4.3)$$

де  $\Delta\tau$  – час запізнення.

Точніше середня температуропровідність верхнього 20-см шару ґрунту ( $\text{см}^2/\text{год}$ ) знаходиться як відношення  $M$  ( $\text{см}^2 \cdot \text{К}$ ) до  $N$  ( $\text{год} \cdot \text{К}$ ), де

$$M = \sum_i m_i \Delta' t_i, \quad (4.4)$$

$$N = \tau \sum_j n_j \Delta'' t_j. \quad (4.5)$$

Тут  $\Delta' t_i$  – різниця температур на стандартних глибинах  $i$ , що дорівнюють 0, 5, 10, 15 і 20 см, у вечірній та вранішній строки вимірювань;  $\Delta'' t_j = \frac{t_0 + t_{20}}{2 - t_{10}}$  ( $t_0, t_{10}, t_{20}$  – температури на глибинах 0, 10 і 20 см в різні денні строки вимірювань  $j$ ;  $\tau$  – інтервал (год) між сусідніми строками вимірювань;  $m_i$  – постійні коефіцієнти для різних глибин  $i$  (додаток 1);  $n_j$  – постійні коефіцієнти, що залежать від кількості денних строків вимірювань, розділені однаковими інтервалами  $\tau$ , мають такі значення:

Кількість денних строків вимірювання	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$	$n_5$	$n_6$
4	0,75	2,25	2,25	0,75	-	-
5	0,62	2,84	1,07	2,84	0,62	-
6	0,66	2,61	1,74	1,74	2,61	0,66

**Задача 4.1.** Знайти зміну середньої температури двох ізольованих проб ґрунту об'ємом по  $20 \text{ см}^3$  при однаковому притоці тепла  $50,24 \text{ Дж}$  і при однаковій тепловіддачі  $41,87 \text{ Дж}$ , якщо перша проба складається з слабо зволоженого піску, а інша з вологого гумусу. Як впливає різниця теплоємностей різних видів ґрунтів на нагрівання (охолодження) ґрунту при однаковому притоці (віддачі) тепла?

**Задача 4.2.** Вага абсолютно сухої проби глинистого ґрунту об'ємом  $40 \text{ см}^3$ , взятої перед початком дощу, дорівнювала  $0,41 \text{ Н}$ . Після тривалого сильного дощу вага нової проби з таким самим об'ємом, склала  $0,49 \text{ Н}$ . Знайти

абсолютну та відносну зміну об'ємної теплоємності даного ґрунту в результаті дощу. Як змінюється теплоємність ґрунту при його зволоженні (просушуванні)? Коли більше нагрівається один і той самий ґрунт при однаковому притоці тепла: до або після дощу?

**Задача 4.3.** Знайти відносну зміну об'ємної теплоємності піску при зміні його вологості від 25 до 10 %. Вказати причину зміни.

**Задача 4.4.** За даними задачі обчислити середні значення температуропровідності верхнього 15-го шару для суші і для моря.

	Глибина, м			
	0	5	10	15
Суша	20,3	3,9	1,7	0,1
Море	19,0	18,6	14,5	7,5

Вказати причину їх різниці. Чому температуропровідність моря помітно відрізняється від температуропровідності не тільки суші, але і нерухомої води.

**Задача 4.5.** Температура ґрунту в напівпустелі та на найближчому зрошуваному бавовняному полі 16 липня 1951 року така:

Строк	Ділянка	Глибина, см				
		0	5	10	15	20
8 30	Напівпустеля	42,1	29,8	29,2	30,4	31,3
	Зрошуване поле	22,4	22,4	21,8	22,1	23,0
10 30	Напівпустеля	55,8	36,5	32,9	31,1	31,2
	Зрошуване поле	26,3	25,1	24,2	23,0	23,2
12 30	Напівпустеля	62,9	40,9	35,9	32,8	31,8
	Зрошуване поле	33,1	30,1	26,7	24,3	23,9
14 30	Напівпустеля	61,3	45,6	39,2	35,0	32,7
	Зрошуване поле	30,6	29,5	27,3	25,5	24,7
16 30	Напівпустеля	50,5	45,4	40,6	36,4	33,8
	Зрошуване поле	27,2	27,4	27,0	25,9	25,2

Обчислити середню температуропровідність верхнього 20-см шару ґрунту на обох ділянках. Вказати причини їх різниці.

**Задача 4.6.** Амплітуда добового ходу температури поверхні ґрунту склала  $31^{\circ}\text{C}$ , а на глибині 20 см  $3,7^{\circ}\text{C}$ . Обчислити середню температуропровідність верхнього 20-см шару ґрунту.

**Задача 4.7.** Максимальна температура поверхні ґрунту відмічена в 12 годин, а на глибині 20 см – в 22 години. Знайти середню теплопровідність верхнього 20-см шару ґрунту. Вважаючи, що вихідні дані цієї і попередньої задач відносяться до одного і того самого пункту і до однакової дати, пояснити причину різниці відповідей.

**Задача 4.8.** Використовуючи подані на початку роботи значення теплопровідності та об'ємної теплоємності, обчислити теплопровідність граніту ( $2,09 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ), вологої глини, сухого піску, нерухокої води і нерухокого повітря. Як впливає збільшення вологості ґрунту на її теплопровідність? Як впливає на швидкість і глибину поширення температурних коливань в ґрунті, нерухокій воді і нерухокому повітрі значна різниця їх теплопровідностей? Як вона впливає на зсув фази коливань температури?

**Задача 4.9.** Проба піщаного ґрунту об'ємом  $100 \text{ см}^3$  до просушування мала вагу  $1,942 \text{ Н}$ , після просушування –  $1,687 \text{ Н}$ . Температура ґрунту в день взяття проби:

Строк, год	Глибина, см				
	0	5	10	15	20
7	18,6	22,6	25,0	25,9	26,5
10	28,0	26,2	25,5	25,5	26,2
13	38,9	31,1	28,3	26,9	26,2
16	33,6	33,0	30,4	28,4	27,8
19	24,2	30,2	29,9	29,0	28,4

Визначити об'ємну теплоємність і середню тепло- і теплопровідність верхнього 20-см шару ґрунту.

**Задача 4.10.** Обчислити теплопровідність снігового покриву при густині  $10^2 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Як і чому зміниться відповідь, якщо густина снігу в результаті слідкування збільшилася в 2 рази?

## 4.2 Теоретичні закони поширення коливань температури в ґрунті

Якщо ґрунт однорідний по вертикалі, то її температура  $t$  на глибині  $z$  в момент часу  $\tau$  визначається з рівняння теплопровідності (рівняння Фур'є)

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (4.6)$$

де  $a$  – теплопровідність.

Основними законами поширення температурних коливань у ґрунті є:

1) закон незмінності періоду коливань з глибиною:



$$T(z) = const ;$$

2) закон зменшення амплітуди коливань з глибиною:

$$A_{z_2} = A_{z_1} e^{-\sqrt{\frac{\pi}{aT}}(z_2 - z_1)}, \quad (4.7)$$

де  $A_{z_1}$  і  $A_{z_2}$  – амплітуди на глибинах  $z_1$  і  $z_2$  ( $z_2 > z_1$ );

$a$  – температуропровідність шару ґрунту, що лежить між глибинами  $z_1$  і  $z_2$ ;

3) закон зсуву фази коливань з глибиною (закон запізнення):

$$\Delta \tau_{z_1 - z_2} = \frac{z_2 - z_1}{2} \sqrt{\frac{T}{a\pi}}, \quad (4.8)$$

де  $\Delta \tau_{z_1 - z_2}$  – запізнення, тобто різниця між моментами настання однакової фази коливань (наприклад, максимуму) на глибинах  $z_1$  і  $z_2$ . Коливання температури проникають в ґрунт до глибини  $z_{пр}$ , що визначається співвідношенням

$$z_{пр} = \sqrt{\frac{aT}{\pi}} \cdot \frac{1}{\lg e} \cdot \lg \frac{A_0}{0,1}. \quad (4.9)$$

Крім того, з формули (4.7) випливає ряд наслідків:

а) глибини, на яких в різних ґрунтах ( $a_1 \neq a_2$ ) амплітуди температурних коливань з однаковим періодом ( $T_1 = T_2$ ) зменшуються в однакову кількість разів  $\left( \frac{A_{z_1}}{A_{z_2}} = const \right)$ , відносяться між собою як корені квадратні з температуропровідності цих ґрунтів:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\sqrt{a_1}}{\sqrt{a_2}}; \quad (4.10)$$

б) глибини, на яких в одному і тому самому ґрунті ( $a = const$ ) амплітуди температурних коливань з різними періодами ( $T_1 \neq T_2$ ) зменшуються на

однакову кількість разів  $\left( \frac{A_{z_1}}{A_{z_2}} = const \right)$ , відносяться між собою як корені квадратні з періодів коливань:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\sqrt{T_1}}{\sqrt{T_2}} . \quad (4.11)$$

**Задача 4.11.** Амплітуда добового ходу температури поверхні ґрунту  $20,7^\circ\text{C}$ . Обчислити амплітуду на глибині 30 см і знайти глибину, на якій коливання температури практично припиняються, якщо середня з глибиною температуропровідність верхнього шару ґрунту в цей день дорівнювала  $18 \text{ см}^2/\text{год}$ .

**Задача 4.12.** Обчислити глибини, на яких зменшується в 2 рази та в  $e$  разів амплітуда добових коливань температури в граніті, сухому піску та нерухомій воді, якщо їх температуропровідності складають  $70, 25$  і  $5 \text{ см}^2/\text{год}$  відповідно. Перевірити відповіді, обчислив відношення коренів квадратних з відповідних значень температуропровідності.

**Задача 4.13.** Обчислити глибини, на яких зменшується в 2 рази амплітуда добових і річних коливань температури в ґрунті з температуропровідністю  $28,3 \text{ см}^2/\text{год}$ . Перевірити відповіді, обчисливши відношення коренів квадратних з періодів коливань.

**Задача 4.14.** За спостереженнями у Фінляндії за декілька літніх днів отримані екстремальні температури поверхні сусідніх ділянок з гранітним ґрунтом:  $34,8$  і  $14,5^\circ\text{C}$ , і з сухим піщаним ґрунтом:  $42,3$  і  $7,8^\circ\text{C}$ .

1. Обчислити амплітуду на кожній ділянці і вказати причину їх різниці.

2. Знайти глибину проникнення добових коливань температури в граніт та в сухий пісок, якщо температуропровідність граніту  $72,0 \text{ см}^2/\text{год}$ , а сухого піску –  $23,0 \text{ см}^2/\text{год}$ . Вказати причини різниці відповідей.

**Задача 4.15.** За даними задачі 4.5 знайти глибину проникнення добових коливань температури на площадках в напівпустелі і на зрошуваному бавовняному полі, якщо температуропровідність ґрунту на першій площадці  $7,7 \text{ см}^2/\text{год}$ , на другій –  $51,2 \text{ см}^2/\text{год}$ . Вказати, який фактор переважно впливає на глибину поширення коливань температури в ґрунті.

**Задача 4.16.** За даними задачі 4.4 обчислити глибину проникнення річних коливань температури для суші і для моря, якщо температуропровідність суші  $29 \text{ см}^2/\text{год}$ , моря –  $945 \text{ см}^2/\text{год}$ . Як впливає на клімат приморських і континентальних районів різниця теплових режимів моря і суші?

**Задача 4.17.** У якомусь пункті максимум температури поверхні ґрунту в добовому ході відмічений у 13 год 25 хв. В який час теоретично настане максимум на глибинах 20, 40 і 60 см, якщо температуропровідність на всіх глибинах дорівнює  $16 \text{ см}^2/\text{год}$ ? Як зміниться відповідь при більшій (меншій) температуропровідності?

**Задача 4.18.** За результатами багаторічних спостережень в Павловську максимальна температура поверхні ґрунту в річному ході спостерігається в 13 год 10 хв, а на глибині 20 см – у 18 год 10 хв. Розрахувати час настання максимуму на глибині 40 см, якщо температуропровідність шарів 0 – 20 і 20 – 40 см однакові. Чи виконується якісно і кількісно закон запізнення, якщо за результатами спостережень максимум на глибині 40 см в Павловську в середньому настає в 23 год 40 хв ? Що можна сказати про температуропровідність шару 20 – 40 см: більше вона чи менше, ніж температуропровідність шару 0 – 20 см ?

### 4.3 Тепловий потік у ґрунті.

Поверхнева щільність теплового потоку в ґрунті визначається за формулою

$$P = -\lambda \frac{\partial t}{\partial z}, \quad (4.12)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність ґрунту;

$-\frac{\partial t}{\partial z}$  – вертикальний градієнт температури.

Миттєві значення  $P$  виражаються в кВт/м<sup>2</sup> з точністю до сотих, суми  $P$  – в МДж/м<sup>2</sup>: годинні і добові – з точністю до сотих, місячні – до одиниць, річні – до десятків.

Середня поверхнева щільність теплового потоку крізь поверхню ґрунту за інтервал часу  $\tau$  описується формулою

$$P = \frac{c}{\tau} z_{\text{пр}} \Delta t_{\text{ср}}, \quad (4.13)$$

де  $c$  – об'ємна теплоємність ґрунту;

$\tau$  – інтервал;

$z_{\text{пр}}$  – глибина проникнення температурних коливань;

$\Delta t_{\text{ср}}$  – різниця середніх температур шару ґрунту до глибини  $z_{\text{пр}}$  в кінці та на початку інтервалу  $\tau$ .

За спостереженнями температури ґрунту на стандартних глибинах  $i$  (0, 5, 10, 15, 20 см) середня поверхнева щільність теплового потоку на поверхні ґрунту визначається за скороченою формулою

$$P = \frac{c}{\tau} S_1, \quad (4.14)$$

або, більш точно, за повною формулою

$$P = \frac{c}{\tau} \left( S_1 - \frac{a}{10} S_2 \right), \quad (4.15)$$

де  $a$  – температуропровідність,

$$S_1 = \sum_i r_i \Delta t_i, \quad S_2 = 0,14 \cdot 10^{-5} \tau (\Delta t'_1 + \Delta t'_2). \quad (4.16)$$

Тут  $r_i$  – постійні коефіцієнти (додаток 1);

$\Delta t_i$  – різниця температур на  $i$ -й глибині в кінці та на початку інтервалу  $\tau$ ;

$\Delta t'_1$  – різниця температур на глибинах 20 і 10 см на початку інтервалу;

$\Delta t'_2$  – теж саме в кінці інтервалу.

Підставляючи у формули значення  $c$  (МДж/(м<sup>3</sup>·К)),  $\tau$  (с),  $\Delta t$  (°С),  $a$  (см<sup>2</sup>/год), отримуємо  $P$  (МВт/м<sup>2</sup>). Під час розрахунків прийнято  $S_1$  та  $S_2$  округляти до тисячних.  $S_1$

**Задача 4.19.** Наближено приймаючи, що температура верхнього шару ґрунту змінюється з глибиною лінійно, обчислити поверхневу щільність теплового потоку в сухому піску, якщо температура його поверхні складає 23,6°С, а температура на глибині 5 см дорівнює 19,4°С. Про що говорить знак відповіді? Чи змінюється температура на глибині 5 см з часом?

**Задача 4.20.** Умовно вважаючи, що температура в сніговому покриві лінійно змінюється з глибиною, знайти поверхневу щільність теплового потоку в покриві висотою 10 см, якщо густина снігу дорівнює 0,2·10<sup>3</sup> кг/м<sup>3</sup>, температура поверхні снігу –14,3°С, температура поверхні ґрунту під снігом –2,7°С. Який напрямок цього потоку?

**Задача 4.21.** Середня теплопровідність земної кори складає 2,34 Вт/(м·К). Температура кори збільшується приблизно на 1°С на кожні 33 м глибини. Приблизно визначити кількість теплоти, що надходить за рік з надр Землі до площадки в 1 м<sup>2</sup> на земній поверхні.

**Задача 4.22.** Багаторічна середня температура ґрунту в Москві на різних глибинах в березні та серпні:

Місяць	Глибина, м												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Березень	-1,4	-0,1	1,4	3,0	4,2	5,1	5,4	6,0	6,2	6,3	6,3	6,1	6,0
Серпень	16,6	14,4	12,3	10,4	8,5	7,2	6,1	5,7	5,4	5,5	5,6	5,8	6,0

Обчислити середню поверхневу щільність теплового потоку в ґрунті за період з 1 березня по 31 серпня, якщо середня об'ємна теплоємність цього ґрунту за вказаний період дорівнює  $2,09 \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ . Знайти кількість теплоти, що накопичується за цей період стовпом ґрунту перерізом  $1 \text{ м}^2$  та глибиною  $12 \text{ м}$ .

### Домашнє завдання

**Задача 4.23.** Температура поверхні і верхнього шару ґрунту за 9 – 11 липня 1951 року:

Дата	Строк, год	Глибина, см				
		0	5	10	15	20
9.07	20	16,7	18,3	17,5	16,8	15,7
10.07	0	14,5	17,2	16,5	15,9	15,3
-//-	4	15,2	16,0	15,4	15,4	14,8
-//-	8	20,6	16,7	16,0	15,5	15,0
-//-	12	23,2	19,0	17,2	16,0	15,7
-//-	16	21,6	19,6	18,3	17,1	16,1
-//-	20	16,2	18,1	17,6	17,0	16,4
11.07	0	11,2	16,0	16,2	16,3	16,1
-//-	4	10,2	14,6	14,8	15,2	15,4

- 1). Побудувати і проаналізувати графік добового ходу температури поверхні ґрунту і температури на всіх глибинах за 10 липня (з 0 до 24 год.).
- 2). Знайти за графіком амплітуду коливання на кожній глибині і описати її зміну з глибиною.
- 3). Визначити час настання максимуму на всіх глибинах.
- 4). Знайти запізнення максимуму на кожній глибині в порівнянні з моментом його настання на поверхні.
- 5). Обчислити середнє для всього шару  $0 - 20 \text{ см}$  запізнення на  $10 \text{ см}$  глибини.
- 6). Побудувати та проаналізувати графік термоізоплет.
- 7). Обчислити середню температуропровідність верхнього  $20\text{-см}$  шару ґрунту.

Варіанти вихідних даних взяти з таблиці 4.1.

Таблица 4.1

№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см					№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см					
			0	5	10	15	20				0	5	10	15	20	
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	1.08	0	8,1	15,2	16,2	16,3	16,0	5	5.08	0	12,9	18,4	18,6	18,4	18,1	
		4	6,4	13,8	14,3	14,9	15,4			4	6,6	15,4	16,4	16,4	16,8	17,1
		8	19,8	14,6	14,3	14,4	14,6			8	23,2	17,4	16,4	16,3	16,5	
		12	21,1	18,4	16,8	15,6	14,9			12	35,0	23,8	20,5	18,2	17,0	
		16	20,2	18,6	17,0	16,5	16,1			16	30,6	26,2	23,6	21,1	19,2	
20	11,4	17,8	17,0	16,7	16,5	20	14,6	20,0	20,4	20,0	19,8					
2	2.08	0	8,2	15,8	15,8	16,1	16,1	6	6.08	0	8,5	14,4	16,8	17,3	17,5	
		4	5,6	13,6	14,1	14,7	14,8			4	11,6	10,4	11,8	12,6	14,8	
		8	19,7	14,8	14,1	13,9	14,6			8	19,7	16,4	15,6	15,8	16,1	
		12	34,9	20,7	17,8	15,9	15,0			12	24,2	19,0	17,2	16,4	16,0	
		16	28,0	21,8	19,4	17,3	16,8			16	20,7	20,2	18,4	17,4	17,0	
20	12,5	19,2	18,4	17,6	17,0	20	13,7	18,5	17,8	17,4	17,2					
3	3.08	0	8,5	16,3	16,4	16,6	17,2	7	7.08	0	7,6	16,6	16,6	17,2	17,6	
		4	9,1	9,8	15,2	15,5	16,2			4	5,8	14,9	15,4	15,8	16,1	
		8	20,9	15,4	13,8	13,6	13,8			8	21,7	16,2	15,3	15,3	15,1	
		12	29,8	25,4	20,8	17,3	16,0			12	29,1	19,5	17,4	15,4	16,1	
		16	33,4	25,5	22,4	19,3	17,6			16	27,3	21,3	18,6	17,4	17,0	
20	16,0	20,4	20,3	19,6	19,2	20	15,6	20,0	18,3	18,3	18,0					
4	4.08	0	9,5	17,2	17,7	17,8	17,6	8	8.08	0	13,8	18,1	17,8	17,7	17,6	
		4	9,5	16,0	16,2	16,6	16,4			4	13,0	17,2	17,0	17,1	16,1	
		8	20,0	16,7	15,9	15,9	17,6			8	25,4	18,2	17,0	16,8	16,7	
		12	33,0	20,6	17,2	16,9	16,4			12	34,3	23,4	19,2	17,8	17,5	
		16	27,4	22,0	20,0	18,5	17,5			16	29,8	23,3	21,0	19,4	17,9	
20	15,8	20,2	19,8	18,8	18,3	20	16,8	21,3	20,3	19,6	19,2					

№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см					№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см				
			0	5	10	15	20				0	5	10	15	20
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
9	9.08	0	11,3	18,5	19,1	19,2	18,6	13	13.08	0	7,5	15,5	16,0	16,5	18,4
		4	9,2	17,6	17,8	18,0	17,6			12,2	15,1	15,0	15,7	16,0	
		8	23,2	18,0	17,2	17,2	17,5			18,2	16,1	15,4	15,5	15,5	
		12	33,9	20,7	18,9	18,2	18,0			31,2	20,3	17,6	16,4	16,0	
		16	27,9	23,2	21,0	19,4	18,3			24,8	22,3	19,8	18,1	17,5	
20	15,9	21,4	20,4	19,6	19,4	14,3	19,8	19,1	18,4	18,0					
10	10.08	0	13,4	19,2	19,1	19,0	18,9	14	14.08	0	13,6	18,3	18,3	18,0	17,8
		4	11,7	17,7	17,8	18,0	18,1			11,1	16,4	16,5	17,0	16,9	
		8	22,4	18,4	17,5	17,5	17,4			20,9	17,1	16,4	16,4	16,4	
		12	30,5	21,4	19,1	18,0	17,8			30,8	21,3	18,5	17,3	16,7	
		16	19,4	21,4	19,9	18,8	18,3			23,4	22,6	20,1	19,2	18,7	
20	17,2	19,6	19,0	18,7	18,5	15,9	20,4	19,6	19,3	19,0					
11	11.08	0	14,5	17,9	18,2	18,1	18,4	15	15.08	0	10,1	18,3	18,4	18,2	18,1
		4	11,0	16,8	17,1	17,4	17,8			12,3	16,7	16,7	17,2	17,4	
		8	21,0	17,6	16,8	16,9	17,2			20,4	17,8	16,8	16,7	16,5	
		12	26,8	23,1	20,5	18,6	17,8			27,4	18,6	16,9	16,8	16,7	
		16	28,8	24,2	22,7	20,2	19,0			19,0	19,0	17,8	17,2	16,9	
20	15,5	19,8	20,2	20,6	20,3	16,8	18,4	17,7	17,3	17,1					
12	12.08	0	11,5	15,1	17,4	18,4	18,4	16	16.08	0	16,0	17,7	17,2	17,2	17,1
		4	10,8	13,8	15,9	17,0	17,3			16,2	17,4	16,9	16,9	16,9	
		8	18,4	16,3	16,0	16,4	17,4			18,1	17,2	16,6	16,6	16,5	
		12	22,7	18,9	17,4	16,8	16,3			22,3	18,6	17,4	16,7	16,5	
		16	18,8	19,0	18,8	17,4	17,0			21,3	19,8	18,6	17,6	17,2	
20	11,4	17,5	17,4	17,3	17,2	14,1	18,1	17,7	17,6	17,5					

№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см					№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см				
			0	5	10	15	20				0	5	10	15	20
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
17	17.08	0	13,1	16,6	16,9	17,0	17,2	21	21.08	0	10,4	15,6	16,8	16,6	16,5
		4	11,8	16,2	16,2	16,4	16,6			4	7,2	14,2	14,8	15,2	15,4
		8	16,8	15,6	15,4	15,6	15,8			8	20,8	15,4	14,8	14,9	14,9
		12	21,6	19,2	17,6	16,6	16,4			12	31,5	19,7	17,2	16,0	15,6
		16	21,0	18,4	18,0	17,5	17,0			16	25,4	21,0	19,0	17,6	17,0
20	11,2	16,2	17,8	17,8	17,7	20	13,2	18,9	18,3	17,8	17,4				
18	18.08	0	8,4	11,3	12,8	14,6	16,0	22	22.08	0	11,4	17,0	16,9	17,0	17,5
		4	6,4	9,4	11,9	13,4	14,4			4	9,2	15,7	16,0	16,2	16,3
		8	17,6	14,4	13,8	14,2	14,3			8	19,7	15,9	15,5	15,6	15,7
		12	19,8	17,0	15,7	15,0	14,5			12	31,1	20,1	17,5	16,4	16,0
		16	19,0	17,7	16,5	15,8	15,3			16	24,8	21,0	19,3	17,5	16,9
20	10,1	16,8	16,4	16,2	16,0	20	11,2	18,9	18,4	18,0	17,0				
19	19.08	0	6,4	14,6	15,1	15,5	15,8	23	23.08	0	10,4	16,2	16,8	17,1	17,3
		4	4,9	13,2	13,8	14,6	15,0			4	6,7	14,9	15,4	16,0	16,4
		8	17,4	13,9	13,5	13,8	13,9			8	18,6	15,4	15,0	14,6	15,5
		12	24,8	17,6	15,7	14,8	14,2			12	28,0	19,0	17,0	15,8	15,4
		16	23,8	19,3	17,4	16,3	16,0			16	16,0	20,4	18,0	17,3	16,8
20	10,8	17,6	17,1	16,8	16,5	20	8,8	17,8	17,3	17,2	17,1				
20	20.08	0	7,3	15,0	15,6	16,4	17,0	24	24.08	0	5,5	15,7	16,6	17,2	17,5
		4	6,6	13,8	14,4	14,8	15,0			4	3,8	14,0	14,6	15,2	15,4
		8	19,6	14,6	14,2	14,4	14,4			8	18,3	14,4	14,2	14,4	14,4
		12	25,2	16,5	15,2	15,0	14,9			12	28,4	18,2	16,2	15,4	14,6
		16	23,6	19,2	17,9	17,7	17,5			16	24,1	20,0	18,1	16,8	16,3
20	13,0	17,4	17,0	16,8	16,7	20	9,0	18,0	17,4	17,0	16,8				



№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см					№ з/п	Дата	Строк, год	Глубина, см				
			0	5	10	15	20				0	5	10	15	20
1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
25	25.08	0 4 8 12 16 20	6,7 4,1 18,1 30,5 26,5 14,0	15,6 14,0 14,4 18,6 20,6 18,5	15,8 14,6 14,0 16,3 18,5 18,0	16,1 15,2 14,4 15,4 17,0 17,4	16,3 15,4 14,6 14,9 16,2 17,3	28	28.08	0 4 8 12 16 20	12,6 11,5 19,6 28,6 24,2 14,4	17,6 16,4 16,4 20,1 21,2 19,6	17,2 16,3 16,0 17,9 19,2 18,9	17,1 16,4 16,0 16,9 18,0 18,8	17,0 16,4 16,1 16,3 17,4 18,6
26	26.08	0 4 8 12 16 20	12,0 9,5 19,5 24,5 21,9 15,4	16,0 15,4 15,2 20,4 20,0 17,9	16,5 15,4 15,4 17,3 18,5 18,2	16,4 16,0 15,5 16,5 17,3 17,1	16,4 16,3 15,6 16,2 16,9 17,5	29	29.08	0 4 8 12 16 20	12,2 13,9 20,0 25,4 26,4 13,6	18,1 16,8 17,0 19,8 21,2 19,4	18,0 16,6 16,6 18,0 19,2 19,0	17,8 16,6 16,6 17,3 18,2 18,4	17,6 16,7 16,6 16,9 18,0 18,0
27	27.08	0 4 8 12 16 20	14,2 13,9 19,2 24,7 21,4 17,4	17,4 16,5 17,0 18,6 19,5 18,7	17,4 16,7 16,4 17,2 18,1 17,8	17,3 16,6 16,4 16,6 17,2 17,4	17,2 16,7 16,5 16,0 16,5 17,0	30	30.08	0 4 8 12 16 20	11,6 10,4 20,3 27,4 22,2 9,8	17,6 16,2 16,8 19,4 20,4 18,2	19,0 16,7 16,4 17,8 19,0 18,9	18,4 16,9 16,4 17,0 18,0 17,9	18,1 17,0 16,4 16,5 17,1 17,5

**Задача 4.24.** Багаторічна середня місячна температура поверхні і верхніх шарів ґрунту під природним покривом є:

Глибина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
0	-9	-8	-5	3	13	18	20	17	11	4	-1	-6
1,6	3,6	2,9	2,4	2,3	4,9	8,4	11,0	12,5	12,1	9,9	7,4	5,0
3,2	6,1	5,3	4,7	4,1	4,3	5,6	7,4	8,9	9,8	9,7	8,8	7,5

1) Побудувати та проаналізувати криві річного ходу температури поверхні ґрунту і температури на обох глибинах (дані відносити до середини місяця).

2) Знайти амплітуду на кожній глибині і вказати характер її зміни з глибиною.

3) Визначити, чи змінюється період коливань з глибиною.

4) Знайти за графіком приблизну дату настання екстремумів на кожній глибині, а також запізнення максимуму в порівнянні з часом його настання на поверхні.

5) Обчислити середнє запізнення на 1 м глибини.

6) Визначити амплітуду річного ходу температури поверхні ґрунту і температури на глибині 3,2 м.

7) Знайти температуропровідність шару 0 – 3,2 м.

8) Обчислити амплітуду на глибині 1,6 м та порівняти з фактичним значенням.

Варіанти вихідних даних взяти з табл. 4.2.

Таблиця 4.2

№ з/п	Глибина, м	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	-10	-10	-7	2	12	17	20	17	10	4	-2	-8
	1,6	2,8	2,3	2,0	2,0	5,5	9,2	11,6	12,9	11,7	9,1	6,1	3,8
	3,2	5,0	4,2	3,8	3,4	4,1	6,1	8,1	9,7	10,2	9,4	8,0	6,3
2	0	-9	-9	-4	7	17	23	24	21	14	6	-1	-6
	1,6	2,6	1,5	1,0	1,8	6,9	11,2	14,0	15,2	13,9	10,8	7,2	4,2
	3,2	5,1	4,0	3,1	2,8	4,7	7,8	10,5	12,2	12,6	11,4	9,3	6,9
3	0	-15	-15	-8	4	17	24	26	22	13	4	-5	-12
	1,6	2,7	1,6	0,9	1,0	3,2	7,2	10,3	12,2	12,3	10,6	7,7	5,1
	3,2	6,2	5,0	4,2	3,7	3,5	4,7	6,4	8,0	9,1	9,4	8,7	7,6
4	0	-6	-5	1	11	20	26	28	27	18	10	2	-3
	1,6	6,7	5,4	4,7	5,8	9,3	12,8	15,4	17,0	16,9	13,9	12,2	9,2
	3,2	10,6	9,3	8,3	7,7	8,3	9,8	11,5	12,9	13,9	14,0	13,3	12,0

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
5	0	-11	-8	2	12	20	26	29	27	20	9	-1	-8
	1,6	6,1	4,7	4,2	6,2	9,8	13,0	15,6	17,4	17,4	15,5	11,8	8,5
	3,2	10,3	8,9	7,9	7,6	8,4	10,0	11,6	13,2	14,1	14,3	13,5	11,9
6	0	1	4	10	19	27	33	34	31	24	16	8	3
	1,6	11,5	10,7	11,4	13,4	16,8	20,1	22,4	23,5	23,1	21,0	17,9	14,1
	3,2	15,9	14,6	14,0	14,0	14,8	16,2	17,7	18,9	19,7	19,8	19,2	17,8
7	0	-10	-10	-6	3	12	17	19	17	10	3	-3	-8
	1,6	3,0	2,5	2,1	2,2	5,4	9,1	11,7	12,8	11,9	9,3	6,5	4,2
	3,2	5,5	4,7	4,1	3,7	4,2	6,1	8,0	9,6	10,1	9,5	8,2	6,7
8	0	-9	-9	-5	5	15	21	23	20	12	5	-2	-7
	1,6	3,6	2,5	1,1	2,0	4,9	9,1	12,1	13,5	13,0	10,7	7,7	5,1
	3,2	6,7	5,7	5,0	4,4	4,4	5,7	7,5	9,2	10,1	10,1	9,3	8,0
9	0	-14	-14	-8	3	13	20	22	19	11	3	-5	-11
	1,6	3,1	2,2	1,6	1,6	4,2	7,8	10,6	12,2	11,9	9,8	6,8	4,3
	3,2	5,3	4,4	3,6	3,2	3,3	4,9	6,9	8,6	9,6	9,6	8,3	6,8
10	0	-5	-5	2	11	20	26	28	27	18	10	3	-2
	1,6	8,0	6,6	5,9	6,8	9,9	12,9	15,5	17,3	17,5	15,8	13,0	10,1
	3,2	11,5	10,3	9,4	8,7	9,1	10,3	11,8	13,2	14,3	14,6	14,0	12,9
11	0	-18	-17	-10	5	17	24	26	22	14	3	-8	-15
	1,6	0,3	-1,1	-1,6	0,1	4,5	10,4	13,3	14,6	14,0	11,0	7,0	3,3
	3,2	4,8	3,4	2,4	1,8	2,5	5,3	8,0	9,8	10,8	10,4	9,0	7,0
12	0	0	4	10	18	28	35	37	34	27	17	8	3
	1,6	12,1	11,4	11,6	13,9	18,1	22,3	25,3	27,1	26,6	23,9	19,8	15,4
	3,2	17,8	16,3	15,3	15,1	16,1	17,8	19,8	21,5	22,5	22,6	21,6	19,7
13	0	-11	-10	-6	3	14	19	21	18	11	4	-3	-8
	1,6	3,1	2,5	2,0	1,3	4,0	7,7	10,6	12,3	11,9	9,4	6,5	4,4
	3,2	5,6	4,8	4,3	3,2	3,5	5,2	7,2	8,9	9,9	9,6	8,1	7,1
14	0	-9	-8	-4	7	17	22	24	21	12	6	-1	-6
	1,6	3,8	3,2	2,5	2,7	6,4	10,1	12,7	13,8	12,9	10,4	8,0	5,4
	3,2	7,3	6,5	5,5	4,8	5,2	6,9	8,3	9,5	9,9	9,6	9,2	8,2
15	0	-14	-13	-8	5	18	25	27	23	14	3	-4	-11
	1,6	3,7	2,5	1,6	1,8	4,4	8,1	11,2	12,8	12,9	10,9	8,1	5,4
	3,2	6,9	5,9	5,0	4,4	4,4	5,2	6,7	8,1	9,2	9,7	9,1	8,2
16	0	-6	-6	0	10	20	26	29	26	18	10	2	-3
	1,6	6,6	5,3	4,6	5,7	9,8	14,0	17,3	19,4	19,4	16,4	12,8	9,0
	3,2	11,3	10,1	8,9	8,4	8,9	10,7	12,4	14,4	15,5	15,1	14,6	13,0
17	0	-16	-15	-8	6	19	25	28	24	15	5	-4	-12
	1,6	2,1	0,9	0,4	1,3	6,4	11,6	15,4	17,1	16,3	12,8	8,2	4,7
	3,2	6,6	5,1	4,0	3,4	4,6	7,3	10,0	12,2	13,2	12,8	2,9	8,6
18	0	1	4	10	19	28	35	37	35	27	17	9	3
	1,6	12,7	11,7	12,2	14,1	17,5	21,3	24,3	25,9	25,3	23,0	19,4	15,5
	3,2	16,3	14,9	14,4	14,9	15,9	17,8	20,0	21,7	22,7	22,2	20,9	18,7

Продовження табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
19	0	-10	-10	-6	3	13	19	20	18	11	4	-2	-7
	1,6	3,5	2,8	2,4	2,4	5,0	8,2	11,0	12,3	12,0	9,9	7,0	4,7
	3,2	5,9	5,1	4,5	4,0	4,3	5,6	7,3	8,7	9,5	9,4	8,5	7,1
20	0	-9	-10	-4	7	17	23	25	22	14	7	-1	-7
	1,6	4,6	3,6	3,0	3,3	6,5	9,7	12,4	14,0	13,8	11,8	9,0	6,5
	3,2	7,4	6,4	5,6	5,0	5,6	7,1	9,0	10,6	11,4	11,3	10,3	8,9
21	0	-15	-15	-8	4	17	25	26	22	13	4	-4	-11
	1,6	3,5	2,1	1,4	1,9	4,8	9,0	12,4	14,0	13,9	11,7	8,5	5,7
	3,2	6,7	5,3	4,4	4,2	4,1	5,7	8,1	10,0	11,1	11,4	10,1	8,9
22	0	-4	-3	3	12	20	26	28	27	20	11	4	-1
	1,6	7,7	6,6	6,0	7,3	10,3	13,4	16,0	17,9	18,1	16,1	13,3	10,1
	3,2	11,7	10,6	9,6	9,0	9,4	10,5	12,0	13,3	14,4	14,8	14,2	13,0
23	0	-16	-15	-8	4	16	22	25	22	13	3	-6	-14
	1,6	2,5	1,4	0,9	1,4	4,9	9,4	12,7	14,4	13,8	11,3	7,7	4,4
	3,2	6,4	5,3	4,4	3,8	4,0	5,6	7,5	9,3	10,2	10,3	9,3	7,8
24	0	2	5	11	20	29	35	37	33	26	16	8	3
	1,6	12,5	11,5	12,3	14,4	18,1	21,9	24,2	25,3	24,7	22,4	19,1	15,4
	3,2	17,0	15,6	15,0	15,1	16,2	18,1	19,7	21,2	21,9	21,7	20,6	18,9
25	0	-10	-10	-5	4	14	18	21	18	11	4	-2	-7
	1,6	3,3	2,5	2,1	2,4	5,6	9,3	11,7	13,2	12,4	10,1	7,3	4,8
	3,2	5,7	4,6	3,8	3,4	4,3	6,4	8,5	10,3	11,0	10,4	9,0	7,2
26	0	-8	-8	-2	9	19	24	26	23	15	7	0	-5
	1,6	5,1	3,9	3,1	3,7	7,1	10,4	13,1	14,7	14,6	12,7	10,0	7,2
	3,2	8,6	7,5	6,5	5,9	6,3	7,6	9,3	10,8	11,8	12,0	11,3	10,0
27	0	-15	-15	-8	5	18	25	27	23	13	4	-4	-11
	1,6	2,6	1,3	0,8	2,1	5,3	9,3	12,3	13,7	13,2	10,8	7,6	4,8
	3,2	6,1	4,5	3,5	3,8	4,1	5,9	8,0	9,5	10,7	10,5	9,2	7,6
28	0	-2	-1	5	13	21	26	29	27	20	12	5	0
	1,6	8,3	6,9	6,4	7,9	11,3	14,8	17,8	19,7	19,6	17,2	14,0	10,6
	3,2	12,4	11,2	10,2	9,7	10,2	11,5	13,1	14,6	15,7	15,9	15,2	13,9
29	0	-18	-17	-10	4	16	23	25	22	14	4	-8	-16
	1,6	3,6	2,7	2,2	2,0	4,4	8,3	11,4	13,2	13,3	11,2	9,1	5,5
	3,2	6,8	5,8	5,0	4,3	4,4	5,7	7,4	9,0	10,0	10,2	9,4	8,1
30	0	2	6	12	20	29	35	36	33	26	18	10	4
	1,6	14,8	13,8	14,3	15,8	18,7	22,0	24,5	25,8	25,7	23,9	21,0	17,4
	3,2	19,4	18,1	17,4	17,1	17,6	18,9	20,3	21,6	22,6	22,8	22,2	21,0

**Задача 4.25.** За даними задачі 4.23 знайти запізнення часу настання максимуму температури на глибинах 5, 10, 15 і 20 см ( $\Delta\tau_5, \Delta\tau_{10}, \Delta\tau_{15}, \Delta\tau_{20}$ ). Обчислити відношення  $\frac{\Delta\tau_{10}}{\Delta\tau_5}$ ,  $\frac{\Delta\tau_{15}}{\Delta\tau_5}$ ,  $\frac{\Delta\tau_{20}}{\Delta\tau_{10}}$  і порівняти отримані значення з теоретичними. Зробити висновок про виконання закону зсуву фази і вказати можливі причини. Варіанти вихідних даних взяти з табл..4.1

***Контрольні питання:***

1. Що таке теплопровідність і в яких одиницях вона вимірюється ?
2. Що таке питома теплоємність і в яких одиницях вона вимірюється ?
3. Як можна знайти об'ємну теплоємність ?
4. Чому дорівнює об'ємна теплоємність води ?
5. Як розраховується температуропровідність з глибиною ?
6. Чи змінюється температура ґрунту з глибиною ?
7. В якому ґрунті теплопровідність більша в сухому чи вологому ?
8. Де більша питома теплоємність в піску чи в торфі ?
9. Який ґрунт більше прогріється щільний чи пухкий ?
10. Назвіть закони поширення коливань в ґрунті.
11. На яку максимальну глибину може прогрітися ґрунт ?
12. В яких одиницях вимірюється температуропровідність ?

## Література

1. Задачник по общей метеорологии; Под ред. проф. В. Г. Морачевского.  
– Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 311 с.

## ДОДАТОК 1

Стала Стефана-Больцмана	– $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .
Сонячна стала	– $I_0 = 1,38 \text{ кВт}/\text{м}^2$ .
Період добового обертання Землі	– $T \approx 24 \text{ год.} = 86\,400 \text{ с.}$
Об'ємний коефіцієнт теплового розширення газів	– $\alpha = \frac{1}{273,15} = 3,66 \cdot 10^{-3} (\text{°C})^{-1}$ .
Питома газова стала водяної пари	– $R_{\text{п}} = 461,51 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ .
Питома газова стала сухого повітря	– $R_{\text{с}} = 287,05 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ .
Універсальна газова стала	– $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кмоль К})$ .
Коефіцієнти $m_i$ у формулі (4.4)	– $m_0 = 1,67$ ; $m_5 = 26,67$ ; $m_{10} = 43,34$ ; $m_{15} = 26,67$ ; $m_{20} = 1,67$
Коефіцієнти $r_i$ у формулі (4.16)	– $r_0 = 0,164$ ; $r_5 = 0,0666$ ; $r_{10} = 0,0350$ ; $r_{15} = 0,0312$ ; $r_{20} = 0,008$

## ДОДАТОК 2

Схиляння Сонця в істинний полудень в 1984 р.

Число	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	-23,05	-17,23	-7,36	4,32	15,04	22,03	23,07	18,02	8,18	-3,10	-14,25	-21,48
2	-23,00	-17,06	-7,13	4,55	15,22	22,11	23,03	17,47	7,56	-3,34	-14,44	-21,57
3	-22,55	-16,49	-6,50	5,18	15,40	22,19	22,58	17,31	7,34	-3,57	-15,03	-22,06
4	-22,49	-16,32	-6,27	5,41	15,57	22,26	22,53	17,15	7,12	-4,20	-15,22	-22,14
5	-22,43	-16,14	-6,04	6,04	16,15	22,33	22,48	16,59	6,50	-4,43	-15,40	-22,22
6	-22,37	-15,56	-5,40	6,26	16,32	22,39	22,42	16,43	6,27	-5,06	-15,58	-22,29
7	-22,30	-15,37	-5,17	6,49	16,48	22,45	22,36	16,26	6,05	-5,29	-16,16	-22,36
8	-22,23	-15,19	-4,54	7,12	17,05	22,51	22,29	16,09	5,43	-5,52	-16,34	-22,43
9	-22,15	-15,00	-4,30	7,34	17,21	22,56	22,22	15,52	5,20	-6,15	-16,51	-22,49
10	-22,06	-14,41	-4,07	7,56	17,37	23,01	22,15	15,35	4,57	-6,38	-17,08	-22,55
11	-21,58	-14,21	-3,43	8,18	17,52	23,05	22,07	15,17	4,35	-7,00	-17,25	-23,00
12	-21,48	-14,02	-3,20	8,40	18,08	23,09	21,59	14,59	4,12	-7,23	-17,41	-23,05
13	-21,39	-13,42	-2,56	9,02	18,23	23,13	21,50	14,41	4,49	-7,45	-17,57	-23,09
14	-21,29	-13,21	-2,32	9,24	18,37	23,16	21,41	14,23	3,26	-8,08	-18,13	-23,13
15	-21,18	-13,02	-2,09	9,45	18,52	23,19	21,32	14,04	3,03	-8,30	-18,28	-23,16
16	-21,08	-12,41	-1,45	10,07	19,06	23,21	21,22	13,34	2,40	-8,52	-18,44	-23,19
17	-20,56	-12,20	-1,21	10,28	19,19	23,23	21,12	13,26	2,16	-9,14	-18,58	-23,21
18	-20,45	-11,59	-0,58	10,49	19,33	23,24	21,02	13,07	1,53	-9,36	-19,13	-23,23
19	-20,33	-11,38	-0,34	11,10	19,46	23,26	20,51	12,47	1,30	-9,58	-19,27	-23,25
20	-20,20	-11,17	-0,10	11,30	19,58	23,26	20,40	12,28	1,07	-10,19	-19,41	-23,26
21	-20,08	-10,56	0,13	11,51	20,11	23,27	20,29	12,08	0,43	-10,41	-19,54	-23,26
22	-19,54	-10,34	0,37	12,11	20,23	23,26	20,17	11,48	0,20	-11,02	-20,07	-23,27
23	-19,41	-10,12	1,01	12,31	20,34	23,26	20,05	11,28	-0,03	-11,23	-20,20	-23,26
24	-19,27	-9,50	1,24	12,51	20,46	23,25	19,53	11,07	-0,27	-11,44	-20,33	-23,25
25	-19,13	-9,28	1,48	13,11	20,57	23,24	19,40	10,47	-0,50	-12,05	-20,44	-23,24
26	-18,58	-9,06	2,12	13,30	21,07	23,22	19,27	10,26	-1,13	-12,26	-20,56	-23,22
27	-18,43	-8,44	2,35	13,49	21,17	23,20	19,13	10,05	-1,37	-12,46	-21,07	-23,20
28	-18,29	-8,21	2,59	14,08	21,27	23,17	19,00	9,44	-2,00	-13,06	-21,18	-23,17
29	-18,12	-7,58	3,22	14,27	21,37	23,14	18,46	9,22	-2,24	-13,26	-21,28	-23,14
30	-17,56	-	3,45	14,46	21,46	23,11	18,31	9,01	-2,47	-13,46	-21,38	-23,10
31	-17,40	-	4,09	-	21,55	-	18,17	8,39	-	-14,06	-	-23,06



### ДОДАТОК 3

Таблиця Бемпорада (значення  $t$  при різних висотах Сонця  $h_*$ )<sup>\*</sup>

$h_*, ^\circ$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	39,6	27,0	19,8	15,4	12,4	10,4	8,9	7,8	6,9	6,18
10	5,60	5,12	4,72	4,37	4,08	3,82	3,59	3,39	3,21	3,05
20	2,90	2,77	2,65	2,55	2,45	2,36	2,27	2,20	2,12	2,06
30	2,00	1,94	1,88	1,83	1,78	1,74	1,70	1,66	1,62	1,59
40	1,55	1,52	1,49	1,46	1,44	1,41	1,39	1,37	1,34	1,32
50	1,30	1,28	1,27	1,25	1,24	1,22	1,20	1,19	1,18	1,17
60	1,15	1,14	1,13	1,12	1,11	1,10	1,09	1,09	1,08	1,07
70	1,06	1,06	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,03	1,02	1,02
80	1,015	1,012	1,010	1,007	1,005	1,004	1,002	1,002	1,001	1,00
90	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

\* – Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. – Л.: Гидрометеоздат, 1971.

### ДОДАТОК 4

Поправки  $\Delta I$  (кВт/м<sup>2</sup>) при різних  $I$  та в різні дати\*

Дати		$I$	$\Delta I$	$I$	$\Delta I$	$I$	$\Delta I$
Перше півріччя	Друге півріччя						
1,01 – 13,02	23,11 - 31,12	0,12 - 0,58	-0,01	0,59 - 0,81	-0,02	0,82 - 1,05	-0,03
14,02 – 7,03	1,11 – 22,11	< 0,18	0,00	0,18 - 0,87	-0,01	> 0,87	-0,02
8,03 – 25,03	14,10 – 31,10	< 0,36	0,00	$\geq 0,36$	-0,01	-	-
26,03 – 11,04	26,09 – 13,10	0	0,00	0	0,00	0	0
12,04 – 30,04	8,09 – 25,09	< 0,36	0,00	$\geq 0,36$	0,01	-	-
1,05 – 21,05	17,08 – 7,09	< 0,18	0,00	0,18 - 0,87	0,01	> 0,87	0,02
22,05 – 30,06	1,07 – 16,08	0,12 - 0,58	0,01	0,59 - 0,81	0,02	0,82 - 1,05	0,03

\* – Таблица Сивкова С. И., пересчитанная в кВт/м<sup>2</sup>. – Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. – Л.: Гидрометеоздат, 1971.

## ДОДАТОК 5

Таблиця для наведення  $I_R$  до висоти Сонця  $h_* = 30^\circ$  \*

$h_*, ^\circ$						$I_R, 30^\circ,$ кВт/м <sup>2</sup>	$h_*, ^\circ$					
10	13	16	19	22	25		36	42	48	54	60	70
0,18	0,24	0,31	0,36	0,40	0,44	<b>0,49</b>	0,54	0,59	0,64	0,67	0,70	0,72
0,20	0,27	0,33	0,39	0,43	0,47	<b>0,52</b>	0,57	0,62	0,67	0,70	0,73	0,75
0,22	0,30	0,36	0,41	0,45	0,49	<b>0,54</b>	0,60	0,66	0,70	0,73	0,75	0,77
0,25	0,33	0,39	0,43	0,48	0,52	<b>0,57</b>	0,63	0,68	0,73	0,75	0,78	0,80
0,28	0,35	0,41	0,46	0,51	0,54	<b>0,60</b>	0,66	0,70	0,75	0,77	0,80	0,82
0,31	0,38	0,44	0,49	0,54	0,57	<b>0,63</b>	0,68	0,73	0,77	0,80	0,82	0,84
0,33	0,40	0,47	0,52	0,57	0,60	<b>0,66</b>	0,71	0,76	0,80	0,82	0,84	0,86
0,36	0,43	0,50	0,55	0,59	0,63	<b>0,68</b>	0,74	0,77	0,81	0,84	0,86	0,88
0,38	0,46	0,53	0,58	0,62	0,66	<b>0,70</b>	0,77	0,80	0,83	0,86	0,88	0,89
0,41	0,49	0,56	0,61	0,65	0,68	<b>0,74</b>	0,79	0,82	0,85	0,88	0,90	0,91
0,44	0,52	0,59	0,63	0,68	0,71	<b>0,77</b>	0,82	0,85	0,88	0,90	0,92	0,94
0,47	0,54	0,61	0,66	0,70	0,74	<b>0,80</b>	0,84	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96
0,50	0,58	0,64	0,70	0,74	0,77	<b>0,82</b>	0,87	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98
0,54	0,61	0,67	0,73	0,77	0,80	<b>0,85</b>	0,90	0,93	0,95	0,97	0,99	1,00
0,56	0,64	0,70	0,75	0,80	0,84	<b>0,88</b>	0,92	0,95	0,97	0,99	1,00	1,02
0,59	0,67	0,73	0,79	0,83	0,87	<b>0,91</b>	0,94	0,97	0,98	1,01	1,03	1,04
0,62	0,70	0,77	0,82	0,85	0,89	<b>0,94</b>	0,97	0,99	1,01	1,03	1,05	1,06
0,66	0,74	0,80	0,85	0,89	0,92	<b>0,96</b>	0,99	1,01	1,03	1,05	1,07	1,08
0,69	0,77	0,84	0,89	0,92	0,95	<b>0,99</b>	1,02	1,04	1,06	1,07	1,09	1,10
0,73	0,81	0,88	0,92	0,96	0,98	<b>1,02</b>	1,05	1,06	1,08	1,10	1,11	1,12
0,77	0,84	0,91	0,96	0,98	1,02	<b>1,05</b>	1,07	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14
0,82	0,89	0,95	0,99	1,01	1,04	<b>1,07</b>	1,10	1,12	1,13	1,14	1,15	1,17
0,87	0,94	0,98	1,02	1,05	1,07	<b>1,10</b>	1,12	1,14	1,16	1,17	1,18	1,19

\* – Сокращенная таблица Сивкова С. И., пересчитанная в кВт/м<sup>2</sup>. – Руководство гидрометеорологическим станциям по актинометрическим наблюдениям. – Л.: Гидрометеоздат, 1971.

## ДОДАТОК 6

Коефіцієнт прозорості  $P_2$ , приведений до  $m = 2$ ,  
в залежності від  $I_{R, 30^\circ}$  \*

$I_{R, 30^\circ}$ , кВт/м <sup>2</sup>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,3	0,466	0,474	0,481	0,489	0,496	0,503	0,510	0,518	0,524	0,531
0,4	0,538	0,545	0,551	0,558	0,564	0,571	0,577	0,583	0,589	0,596
0,5	0,602	0,608	0,613	0,619	0,625	0,631	0,637	0,642	0,648	0,653
0,6	0,659	0,664	0,670	0,675	0,681	0,686	0,691	0,696	0,702	0,707
0,7	0,712	0,717	0,722	0,727	0,732	0,737	0,742	0,747	0,751	0,756
0,8	0,761	0,766	0,770	0,775	0,780	0,784	0,789	0,793	0,798	0,803
0,9	0,807	0,812	0,816	0,820	0,825	0,829	0,834	0,838	0,842	0,846
1,0	0,851	0,855	0,859	0,864	0,868	0,872	0,876	0,880	0,884	0,888

\* – Пересчитанная в кВт/м<sup>2</sup> таблица Сивкова С. И. Методические указания по определению характеристик прозрачности атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965.

## ДОДАТОК 7

Значення  $K_1$  при різних  $\Delta t$  і  $\Delta u$ , за Дубровіним Л.В.

$\Delta u$ , м/с	$\Delta t^{\circ C}$									
	-2,0	-1,9	-1,8	-1,7	-1,6	-1,5	-1,4	-1,3	-1,2	-1,1
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
0,7	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,8	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
0,9	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
1,0	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04
1,1	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05
1,2	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
1,3	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
1,4	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07
1,5	0,06	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
1,6	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
1,7	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10
1,8	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11
1,9	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11
2,0	0,19	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12
2,1	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13
2,2	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14
2,3	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15
2,4	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16
2,5	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17
2,6	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18
2,7	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19
2,8	0,18	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20
2,9	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21
3,0	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22
3,1	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23
3,2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
3,3	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
3,4	0,24	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
3,5	0,24	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27

$\Delta u$ , m/c	$\Delta t^{\circ}C$									
	-1,0	-0,9	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
0,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01
0,4	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
0,5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
0,6	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04
0,7	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05
0,8	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
0,9	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07
1,0	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07	0,08
1,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07	0,08	0,09
1,2	0,06	0,06	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,08	0,09	0,10
1,3	0,06	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,09	0,10	0,11
1,4	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09	0,10	0,11	0,12
1,5	0,08	0,08	0,09	0,09	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,13
1,6	0,09	0,09	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,14
1,7	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15
1,8	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16
1,9	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,16	0,17
2,0	0,13	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18
2,1	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,19
2,2	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,19	0,20
2,3	0,16	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21
2,4	0,17	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,22
2,5	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
2,6	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,23	0,24
2,7	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,24	0,26
2,8	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,25	0,27
2,9	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,28
3,0	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,27	0,29
3,1	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,30
3,2	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,29	0,31
3,3	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,32
3,4	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,32	0,34
3,5	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,32	0,34

$\Delta u$ , м/с	$\Delta t^{\circ}C$										
	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,3	0,03	0,05	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,12	0,12	0,13	0,14
0,4	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14
0,5	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14
0,6	0,06	0,08	0,09	0,10	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14
0,7	0,07	0,09	0,10	0,11	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15
0,8	0,08	0,10	0,11	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,15
0,9	0,09	0,11	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16
1,0	0,10	0,12	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17
1,1	0,11	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18
1,2	0,12	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19
1,3	0,14	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20
1,4	0,15	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21
1,5	0,16	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22
1,6	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23
1,7	0,18	0,19	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24
1,8	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25
1,9	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26
2,0	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,27
2,1	0,22	0,23	0,24	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28
2,2	0,23	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29
2,3	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30
2,4	0,25	0,26	0,27	0,28	0,28	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31
2,5	0,26	0,28	0,28	0,29	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32
2,6	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33
2,7	0,28	0,30	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34
2,8	0,29	0,30	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35
2,9	0,30	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36
3,0	0,31	0,32	0,33	0,34	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37
3,1	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38
3,2	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39
3,3	0,34	0,35	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40
3,4	0,35	0,36	0,38	0,38	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41
3,5	0,36	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42

$\Delta u$ , m/c	$\Delta t^{\circ}C$									
	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
0,3	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23
0,4	0,14	0,15	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,19	0,20	0,21
0,5	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
0,6	0,15	0,15	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,19	0,19
0,7	0,15	0,16	0,16	0,16	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19
0,8	0,16	0,16	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,20
0,9	0,17	0,17	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20
1,0	0,18	0,18	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21
1,1	0,18	0,19	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22
1,2	0,19	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22
1,3	0,20	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23
1,4	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24
1,5	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25
1,6	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26
1,7	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27
1,8	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27	0,28
1,9	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29
2,0	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,30
2,1	0,28	0,28	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,31
2,2	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32
2,3	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32
2,4	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33
2,5	0,32	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34
2,6	0,33	0,33	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35
2,7	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,36
2,8	0,35	0,35	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37
2,9	0,36	0,36	0,36	0,37	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38
3,0	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,38	0,39	0,39	0,39	0,40
3,1	0,38	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,40	0,40	0,40	0,41
3,2	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42
3,3	0,40	0,41	0,41	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
3,4	0,41	0,42	0,42	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44
3,5	0,43	0,43	0,43	0,43	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44

Редактор

***В. В. Терземан***

Комп'ютерна верстка

***Є. С. Корнійчук***

Здано в набір 17.01.2013 Підписано до друку 13.03.2013

Формат 60/88/16 Зам. № 5076

Тираж 100 прим. Обсяг: 4,0 ум. друк. арк.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO  
у друкарні редакційно-видавничого центру ОНАЗ ім. О.С. Попова  
**ОНАЗ, 2013**