

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ “ГІДРОФІЗИКА”

Одеса
«Екологія»
2008

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ “ГІДРОФІЗИКА”

“Затверджено”
на засіданні методичної комісії
гідрометеорологічного інституту
протокол № 12 від 25.06. 2007 р.
голова комісії _____ Єхніч М.П.

Одеса
«Екологія»
2008

Збірник методичних вказівок до практичних занять з дисципліни
“Гідрофізика” / доц. Крес Л.Є. – Одеса, ОДЕКУ, 2007, 82 с.

Збірник призначений для студентів IV курсу денної форми навчання
за спеціальністю “Гідрологія та гідрохімія”.

Зміст

Передмова	4
1 Розрахунок температури поверхні води водойм в період, вільний від льоду.....	5
2 Розрахунок температури поверхні води методом суперпозиції	39
3 Розрахунок дати початку льодоутворення на річках.....	51
4 Розрахунок теплопередачі від води до повітря крізь снігольодяний покрив.....	55
5 Розрахунок розподілу температури води по глибині під льодом слабопроточного водосховища.....	59
6 Розрахунок довжини ополонки.....	65
7 Розрахунок наростання товщини льоду.....	73
Перелік питань для самоконтролю.....	77
Вихідні дані.....	78

Передмова

Мета збірника методичних вказівок до практичних робіт з дисципліни “Гідрофізика” – вивчення фізичних процесів у водних об’єктах суші – нагрівання, охолодження, льодоутворення тощо.

Завдання – вироблення у студентів розуміння суті фізичних процесів, що протікають у водоймах суші, термічного та льодового режимів.

Після виконання завдань студенти повинні:

- **знати** основні фізичні властивості природних вод; тепловий баланс водойм; процес льодоутворення; особливості термічного режиму водосховищ.

- **вміти** виконувати розрахунки рівняння теплового балансу та його складників; розрахунки температури води та товщини льодяного покриву.

Для успішного засвоєння дисципліни необхідні знання та вміння з дисциплін “Фізична гідрологія”, “Вища математика”, “Фізика”.

Гідрофізика є частиною загальної гідрології, це розділ геофізики, який вивчає фізичні процеси гідросфери, фізичні якості природних вод суші, фізичні процеси у водних об’єктах суші, такі як нагрівання та охолодження, льодоутворення, випаровування тощо.

Гідрофізика має велике значення при проектуванні гідротехнічних та інших господарських споруд, при складанні прогнозів термінів встановлення та руйнування льодяного покриву, при складанні водогосподарських балансів водосховищ тощо.

Отримані студентами знання і вміння використовуються при вивченні таких дисциплін, як “Гідрологічні прогнози”, “Гідрологічні розрахунки”, “Меліоративна гідрологія”, “Водогосподарські розрахунки”.

Практичні завдання складаються з двох модулів (Робоча програма з дисципліни “Гідрофізика”, 2006 р.). Оцінка кожного практичного завдання складає 15 балів:

- присутність на заняттях – 1 бал;
- рівень підготовки до практичної роботи – 2;
- виконання розрахунків – 4;
- оформлення роботи – 2;
- захист практичної роботи, відповідь на контрольні запитання – 6.

Вихідні дані видаються викладачем.

1 Розрахунок температури поверхні води водойм в період, вільний від льоду

Розрахунок температури води в поверхневому шарі виконується за допомогою рівняння теплового балансу водойми для окремих її ділянок. Сума складників рівняння дорівнюється зміні тепловмісту водойми за певний проміжок часу. При цьому приймається допущення: температура води за глибиною однакова. Якщо поділити ряд складників рівняння теплового балансу на ті, що залежать та ті, що не залежать від температури води, можна отримати диференціальне рівняння, інтегрування якого при наданих початкових умовах, дозволяє визначати хід середньої температури води на вертикалі за часом. Середня температура води $t_{сер}$ замінюється температурою поверхневого шару води t_n :

$$t_{сер} = \mu t_n; \quad \mu = \frac{t_{сер}}{t_n}. \quad (1.1)$$

Тоді рівняння теплового балансу має вигляд:

$$\Delta S = \frac{C\rho}{\Delta\tau} \left(\mu_k t_{n,k} H_k \frac{F_k}{F_{сер}} - \mu_n t_{n,n} H_n \frac{F_n}{F_{сер}} \right), \quad (1.2)$$

де C - питома теплоємність, $4.2 \cdot 10^3$ Дж/кг·с; ρ - густина води, 1000 кг/м³; ΔS - зміна запасів теплоти води за розрахунковий період $\Delta\tau$; H_n , F_n та H_k , F_k - глибина та площа водного дзеркала водойми на початок та кінець розрахункового інтервалу часу; $F_{сер}$ - середня площа водного дзеркала за розрахунковий період $\Delta\tau$.

При визначенні температури води за розрахунковий період $\Delta\tau$ задається температура води на початок розрахункового періоду. Якщо вона невідома, то за початкову температуру приймається температура води першого розрахункового місяця у першу добу після очищення водойми від льоду навесні, 2.5°C . Тому температура води наприкінці періоду розрахунку $t_{n,k}$ замінюється на шукану середню за той же інтервал часу при температурі t_n . Для заміни використовуються формула лінійної інтерполяції

$$t_{n,k} = 2t_n - t_{n,n}. \quad (1.3)$$

Якщо зміна рівня водойми та зміна коефіцієнта μ за розрахунковий період невелика, і температура опадів, вод притоку та стоку мало відрізняється від температури поверхні води, можна прийняти, що

$$\mu_k H_k \approx \mu_n H_n. \quad (1.4)$$

Тоді

$$\Delta S = \frac{2\mu_{сер} H_{сер}}{\Delta \tau} (t_n - t_{n,n}), \quad (1.5)$$

де $\mu_{сер}$ та $H_{сер}$ - середні значення за розрахунковий період.

Завдання

Розрахувати температуру поверхні води водосховища за період, вільний від льоду.

Вихідні дані:

1. Місцезаповнення водосховища (ф п.ш.), його площа, площа водного дзеркала та середня глибина.

2. Метеорологічні дані: середньомісячні значення температури повітря, θ_{200} ; парціальний тиск водяної пари, e_{200} ; загальна – N_3 та нижня - N_n хмарність.

3. Середня довжина розгону повітряного потоку.

Пояснення до завдання

А. Розрахунок температури води умовної водойми, за яку приймається водойма зі середньою довжиною розгону повітряного потоку $L_{сер}=5$ км, сталою швидкістю вітру $\omega_{200}=4$ м/с та глибиною, яка прямує до 0.

1. Визначають сумарну кількість теплоти, поглинутої водою, Вт/м²:

$$\Phi = S_p + S_{ва} + a_3 \theta'_{200} + a_6 e'_{200} + S_{дн}, \quad (1.6)$$

де S_p - поглинута водою сумарна сонячна радіація, визначається в залежності від загальної та нижньої хмарності і широти місцевості за

табл. 1.1; S_{ea} - поглинуте водою зустрічне випромінювання атмосфери:

$$S_{ea} = (b_1 + b_2) \sigma T_{200}^4, \quad (1.7)$$

де b_1 та b_2 - параметри, які залежать від абсолютної вологості повітря та загальної та нижньої хмарності, визначається за табл. 1.2 та 1.3; σ - стала Стефана-Больцмана; T_{200} - абсолютна температура повітря за даними спостережень на метеостанції; $\sigma T_{200}^4 = \sigma (273.16 + \theta_{200})^4$ визначається за табл. 1.4; a_3 та a_6 - параметри, які залежать від швидкості вітру та довжини розгону повітряного потоку (для умовної водойми $a_3=8.54$ та $a_6=12.9$); θ_{200} та e_{200} - відповідно середня за місяць температура ($^{\circ}\text{C}$) та вологість повітря (мб) на висоті 200 см (2 м) за даними континентальної метеостанції, розташованої біля водойми; S_{dn} - теплообмін водної маси з дном водойми, визначається в залежності від широти місцевості та середньої глибини водойми за табл. 1.5.

2. За величиною Φ за табл. 1.6 визначається значення температури води $t_{o,y}$ для умовної водойми при допущенні, що середня швидкість вітру 4 м/с, а різниця між температурою води та повітря дорівнює нулю.

3. Розраховують поправку до температури води умовної водойми, яка враховує фактичну різницю температури поверхні води та повітря:

$$\Delta t = 0.14(t_{o,y} - \theta'_{200}). \quad (1.8)$$

4. Розрахункове значення сталої температури поверхні води умовної водойми при реальних співвідношеннях температури води і повітря розраховують за формулою:

$$t_y = t_{o,y} - \Delta t. \quad (1.9)$$

Такі розрахунки виконують за всі місяці безльодоставного періоду, а також за перший (після встановлення льодоставу) та останній (попереду скресання) місяці з льодоставом.

Таблиця 1.1 - Значення поглинутої водою сумарної сонячної радіації S_p (Вт/м²) у залежності від широти місцевості, загальної та нижньої хмарності

Хмарність		Північна широта					
Нижня N_H	Загальна N_Z	30	40	50	60	70	
1	2	3	4	5	6	7	
Березень							
0	0.0	240	204	168	119	69	
	0.1	231	196	161	113	66	
	0.2	223	189	154	108	63	
	0.3	215	181	147	103	60	
	0.4	207	174	140	98	57	
	0.5	199	166	133	93	54	
	0.6	190	158	126	88	51	
	0.7	182	150	119	83	48	
	0.8	174	143	111	78	45	
	0.9	165	134	104	73	42	
	1.0	156	127	97	68	39	
0.1	0.1	224	190	156	110	65	
	0.2	216	183	150	106	61	
	0.3	207	175	143	100	58	
	0.4	199	167	135	95	55	
	0.5	191	159	129	90	52	
	0.6	183	152	121	85	49	
	0.7	175	144	114	80	46	
	0.8	166	137	107	75	43	
	0.9	157	128	100	70	40	
		1.0	148	120	93	65	37
0.2	0.2	208	176	145	105	61	
	0.3	199	168	138	98	58	
	0.4	191	161	131	93	54	
	0.5	183	153	124	88	51	
	0.6	175	146	117	82	48	
	0.7	166	138	110	77	45	
	0.8	157	130	103	72	41	
	0.9	149	124	96	67	38	
		1.0	140	114	88	61	35
	0.3	0.3	192	163	134	95	56
0.4		183	155	127	90	54	
0.5		175	147	120	85	50	

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.6	167	140	112	80	47
	0.7	158	132	105	74	44
	0.8	150	124	98	69	40
	0.9	141	116	91	64	37
	1.0	132	108	84	59	34
0.4	0.4	176	149	122	87	52
	0.5	167	141	115	82	48
	0.6	159	133	108	76	45
	0.7	151	126	101	71	42
	0.8	142	118	94	66	38
	0.9	133	110	86	60	35
	1.0	125	102	79	55	32
0.5	0.5	159	135	110	79	47
	0.6	151	128	104	73	43
	0.7	143	120	96	68	40
	0.8	134	112	89	63	36
	0.9	126	104	82	58	33
	1.0	117	96	75	52	30
0.6	0.6	143	121	99	71	42
	0.7	135	113	92	65	38
	0.8	126	106	84	60	35
	0.9	118	98	78	55	32
	1.0	109	90	71	49	28
0.7	0.7	127	108	88	62	37
	0.8	118	99	80	58	33
	0.9	110	91	73	51	30
	1.0	101	84	66	46	26
0.8	0.8	110	93	76	54	32
	0.9	102	85	69	49	28
	1.0	93	77	61	41	25
0.9	0.9	94	79	64	45	26
	1.0	85	71	57	39	23
1.0	1.0	77	64	52	36	21
Квітень						
0	0.0	283	263	242	204	167
	0.1	274	252	232	196	160
	0.2	264	242	221	187	152
	0.3	254	234	214	180	145

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.4	246	225	204	171	137
	0.5	237	216	196	163	130
	0.6	227	206	186	155	123
	0.7	218	197	177	146	115
	0.8	209	188	168	138	108
	0.9	200	179	158	130	100
	1.0	191	165	149	127	93
0.1	0.1	264	253	224	190	156
	0.2	254	234	214	181	149
	0.3	245	226	207	174	141
	0.4	236	217	198	166	134
	0.5	227	207	189	157	126
	0.6	217	199	180	149	119
	0.7	209	190	170	141	112
	0.8	199	180	160	132	104
	0.9	191	171	151	124	97
	1.0	181	162	142	116	89
0.2	0.2	245	227	209	177	144
	0.3	236	218	200	168	137
	0.4	226	209	191	160	130
	0.5	216	199	182	152	122
	0.6	208	191	172	144	115
	0.7	199	180	163	135	108
	0.8	190	172	154	127	100
	0.9	180	162	144	119	93
	1.0	171	153	135	110	85
0.3	0.3	226	209	193	163	134
	0.4	216	200	183	155	126
	0.5	207	191	175	147	119
	0.6	198	181	166	138	111
	0.7	189	172	156	130	104
	0.8	180	164	147	132	96
	0.9	170	154	137	113	89
	1.0	161	144	128	105	82
0.4	0.4	207	192	177	150	123
	0.5	197	182	168	142	115
	0.6	188	173	158	133	108
	0.7	179	164	149	125	100
	0.8	170	155	140	116	93

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.9	161	146	131	108	85
	1.0	152	136	121	99	77
0.5	0.5	188	174	161	136	111
	0.6	179	165	152	128	104
	0.7	170	156	142	120	98
	0.8	160	146	132	110	89
	0.9	151	137	123	102	81
	1.0	142	128	114	94	73
0.6	0.6	169	157	144	127	100
	0.7	160	147	135	114	93
	0.8	151	138	125	105	84
	0.9	141	129	116	96	76
	1.0	132	120	107	87	69
0.7	0.7	150	139	129	108	88
	0.8	141	130	119	99	80
	0.9	132	120	109	91	72
	1.0	122	111	100	82	64
0.8	0.8	131	121	111	94	76
	0.9	122	112	102	85	68
	1.0	113	103	93	77	60
0.9	0.9	112	103	95	80	64
	1.0	104	94	85	71	56
1.0	1.0	93	85	78	65	52
Травень						
0	0.0	305	300	295	280	264
	0.1	295	289	284	268	253
	0.2	286	280	274	258	242
	0.3	277	270	264	247	231
	0.4	268	260	253	237	220
	0.5	259	251	243	226	209
	0.6	250	241	232	216	198
	0.7	242	232	222	204	187
	0.8	233	222	211	193	176
	0.9	223	212	200	182	213
	1.0	215	203	190	171	154
0.1	0.1	284	279	275	261	246
	0.2	275	270	265	250	235
	0.3	266	260	254	239	224

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.4	257	250	244	228	213
	0.5	248	240	233	218	202
	0.6	239	231	223	207	191
	0.7	230	221	213	196	180
	0.8	221	211	202	185	169
	0.9	213	202	191	175	158
	1.0	203	192	180	164	147
0.2	0.2	264	260	255	242	228
	0.3	254	250	245	231	217
	0.4	245	240	234	220	206
	0.5	236	230	224	210	195
	0.6	227	220	214	199	184
	0.7	219	211	204	188	173
	0.8	210	202	192	177	162
	0.9	201	191	181	166	151
	1.0	192	181	170	155	139
0.3	0.3	243	240	236	223	211
	0.4	234	229	225	213	200
	0.5	225	220	215	202	189
	0.6	216	210	204	191	177
	0.7	207	201	193	180	166
	0.8	198	191	183	168	155
	0.9	189	180	172	158	143
	1.0	180	170	161	146	132
0.4	0.4	223	219	216	204	193
	0.5	214	210	206	194	182
	0.6	204	200	195	182	170
	0.7	196	190	185	172	159
	0.8	187	180	174	161	148
	0.9	178	170	162	149	136
	1.0	168	160	152	138	125
0.5	0.5	202	199	196	186	176
	0.6	194	190	186	175	164
	0.7	185	180	176	164	153
	0.8	176	170	164	153	141
	0.9	166	159	153	142	130
	1.0	157	149	142	130	118
0.6	0.6	182	180	177	167	157

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.7	173	169	166	156	145
	0.8	164	159	155	144	134
	0.9	155	149	144	133	122
	1.0	145	139	133	121	110
0.7	0.7	162	159	156	148	139
	0.8	153	149	145	136	127
	0.9	144	139	134	125	116
	1.0	134	129	123	113	104
0.8	0.8	141	138	135	128	120
	0.9	132	129	125	117	108
	1.0	123	119	114	106	97
0.9	0.9	120	118	116	109	102
	1.0	112	108	105	97	89
1.0	1.0	100	97	95	89	83
Червень						
0	0.0	310	315	320	320	319
	0.1	301	305	310	308	306
	0.2	292	296	299	296	293
	0.3	283	285	288	283	279
	0.4	274	276	276	272	266
	0.5	265	266	266	260	253
	0.6	257	256	255	247	240
	0.7	247	246	244	235	237
	0.8	239	236	233	224	214
	0.9	230	227	222	211	201
	1.0	221	216	211	199	187
0.1	0.1	289	294	299	298	298
	0.2	280	284	288	286	284
	0.3	271	274	276	274	271
	0.4	262	264	266	262	258
	0.5	253	254	255	250	245
	0.6	245	245	244	233	231
	0.7	235	234	233	226	218
	0.8	227	225	223	214	207
	0.9	218	215	211	202	192
	1.0	209	205	201	190	179
0.2	0.2	269	281	277	276	276
	0.3	259	262	265	264	263

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.4	250	252	255	252	250
	0.5	242	240	239	238	236
	0.6	233	233	234	228	223
	0.7	223	222	222	216	209
	0.8	215	213	211	204	196
	0.9	206	204	201	192	182
	1.0	197	193	189	179	169
0.3	0.3	247	251	255	255	255
	0.4	239	242	244	243	242
	0.5	229	231	233	230	228
	0.6	221	222	223	219	215
	0.7	212	211	211	206	201
	0.8	203	202	201	194	187
	0.9	194	192	190	182	174
	1.0	185	182	179	169	160
0.4	0.4	227	230	233	234	234
	0.5	218	220	222	221	220
	0.6	209	210	212	209	207
	0.7	200	200	201	197	193
	0.8	192	191	190	184	179
	0.9	182	180	179	172	165
	1.0	174	171	168	160	152
0.5	0.5	206	209	212	212	212
	0.6	197	199	201	199	198
	0.7	188	189	190	187	184
	0.8	180	180	180	175	171
	0.9	169	169	169	163	157
	1.0	161	159	157	150	143
0.6	0.6	186	188	190	191	191
	0.7	176	178	179	178	177
	0.8	167	164	161	166	163
	0.9	158	158	157	154	149
	1.0	149	148	146	140	134
0.7	0.7	165	166	168	168	169
	0.8	156	156	156	156	155
	0.9	146	145	146	143	140
	1.0	137	135	135	131	126
0.8	0.8	144	145	147	147	146
	0.9	134	135	136	133	132

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	
	1.0	125	125	125	121	117	
0.9	0.9	122	124	125	125	124	
	1.0	114	114	114	111	108	
1.0	1.0	102	102	103	103	102	
Липень							
0	0.0	300	300	300	297	293	
	0.1	292	291	290	286	281	
	0.2	283	281	279	275	269	
	0.3	275	272	269	263	257	
	0.4	266	262	259	252	245	
	0.5	258	253	248	241	233	
	0.6	249	243	237	229	221	
	0.7	240	233	227	218	209	
	0.8	231	224	216	206	197	
	0.9	223	214	206	196	185	
	1.0	215	204	195	184	173	
0.1	0.1	281	281	280	277	274	
	0.2	271	271	270	266	262	
	0.3	264	261	259	254	250	
	0.4	254	252	248	243	238	
	0.5	247	243	239	232	226	
	0.6	238	232	228	221	214	
	0.7	228	223	217	209	202	
	0.8	220	213	206	198	190	
	0.9	212	204	196	186	177	
		1.0	204	194	185	175	165
0.2	0.2	261	260	260	257	254	
	0.3	252	251	250	246	242	
	0.4	243	241	239	235	230	
	0.5	235	231	228	223	218	
	0.6	226	222	217	212	206	
	0.7	217	212	207	201	194	
	0.8	209	203	196	189	181	
	0.9	200	193	186	178	169	
		1.0	192	183	175	166	157
	0.3	0.3	241	240	240	238	235
0.4		233	231	229	226	223	
0.5		224	221	218	215	211	
0.6		215	211	208	203	199	

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.7	206	202	197	192	186
	0.8	197	192	187	180	174
	0.9	189	182	176	169	162
	1.0	181	173	166	160	150
0.4	0.4	221	220	219	217	216
	0.5	213	211	209	206	204
	0.6	204	201	198	194	191
	0.7	194	191	187	183	179
	0.8	186	181	177	172	167
	0.9	178	172	167	160	155
	1.0	169	162	156	149	142
0.5	0.5	201	200	199	198	196
	0.6	192	190	188	186	183
	0.7	184	180	178	174	171
	0.8	175	171	167	163	159
	0.9	166	161	156	152	146
	1.0	157	152	146	140	134
0.6	0.6	181	180	179	177	176
	0.7	172	170	168	166	163
	0.8	164	161	157	155	151
	0.9	155	151	147	143	139
	1.0	146	141	136	132	127
0.7	0.7	161	159	158	156	156
	0.8	153	150	147	145	144
	0.9	144	140	137	134	131
	1.0	135	131	126	123	119
0.8	0.8	142	140	138	136	135
	0.9	133	130	127	125	123
	1.0	124	120	116	114	111
0.9	0.9	121	119	117	116	115
	1.0	113	109	107	105	104
1.0	1.0	102	99	96	95	94
Серпень						
0	0.0	277	269	261	233	206
	0.1	267	259	251	224	197
	0.2	259	251	242	215	189
	0.3	252	242	231	205	180
	0.4	242	232	222	197	171
	0.5	235	224	212	187	162

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.6	228	215	202	178	153
	0.7	220	206	192	168	144
	0.8	212	197	182	158	135
	0.9	205	189	172	149	126
	1.0	198	180	162	140	117
0.1	0.1	258	251	244	218	193
	0.2	250	242	234	209	184
	0.3	241	232	223	199	175
	0.4	233	224	215	190	166
	0.5	225	215	204	180	157
	0.6	217	206	194	171	148
	0.7	209	197	184	162	139
	0.8	203	189	175	153	130
	0.9	194	179	164	143	121
	1.0	187	171	154	133	112
0.2	0.2	240	232	226	203	179
	0.3	231	224	216	193	169
	0.4	223	215	206	183	160
	0.5	215	206	196	174	152
	0.6	207	197	186	164	143
	0.7	199	188	177	155	133
	0.8	192	180	167	146	125
	0.9	184	170	156	136	116
	1.0	178	162	146	127	107
	0.3	0.3	221	215	208	186
0.4		213	206	199	177	156
0.5		205	197	189	168	147
0.6		197	188	179	158	138
0.7		189	179	168	149	129
0.8		182	170	159	139	120
0.9		175	162	148	130	111
1.0		167	153	138	120	102
0.4		0.4	203	197	191	171
	0.5	194	187	180	161	142
	0.6	187	179	171	152	132
	0.7	180	170	161	142	123
	0.8	172	161	151	132	114
	0.9	164	153	141	123	105
	1.0	156	144	131	113	96

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
0.5	0.5	184	179	173	155	136
	0.6	177	170	163	145	127
	0.7	170	161	153	135	118
	0.8	162	153	143	126	108
	0.9	155	144	133	116	99
	1.0	147	135	123	107	90
0.6	0.6	167	161	156	139	122
	0.7	160	153	145	130	113
	0.8	152	144	135	120	104
	0.9	144	135	125	109	94
	1.0	136	126	115	100	85
0.7	0.7	150	144	138	123	108
	0.8	142	135	128	113	98
	0.9	134	126	118	104	89
	1.0	126	117	108	94	80
0.8	0.8	132	126	120	106	93
	0.9	124	117	109	99	88
	1.0	115	108	100	87	75
0.9	0.9	113	108	102	90	78
	1.0	104	98	92	81	69
1.0	1.0	94	89	84	74	63
Вересень						
0	0.0	244	219	194	150	106
	0.1	239	213	186	144	101
	0.2	233	205	179	137	96
	0.3	226	198	170	131	91
	0.4	218	191	163	125	86
	0.5	211	182	155	118	82
	0.6	203	175	147	112	77
	0.7	194	167	138	106	72
	0.8	186	158	131	99	68
	0.9	178	150	120	93	63
1.0	169	142	114	86	58	
0.1	0.1	230	206	181	140	99
	0.2	224	199	173	133	94
	0.3	217	191	165	127	89
	0.4	210	183	157	121	84
	0.5	203	176	150	115	80
	0.6	194	167	141	108	74

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.7	186	159	133	101	70
	0.8	178	152	126	95	65
	0.9	169	143	117	88	60
	1.0	161	135	109	83	55
0.2	0.2	216	192	168	130	92
	0.3	209	184	160	124	87
	0.4	202	177	152	117	82
	0.5	194	169	144	110	77
	0.6	186	161	136	105	72
	0.7	177	152	128	98	67
	0.8	170	145	120	91	62
	0.9	161	136	112	84	58
	1.0	152	128	104	78	52
0.3	0.3	201	178	155	120	85
	0.4	193	170	147	113	80
	0.5	185	162	139	107	75
	0.6	177	154	131	101	70
	0.7	169	146	123	94	65
	0.8	160	138	115	87	60
	0.9	152	130	107	81	55
	1.0	143	120	99	74	49
0.4	0.4	185	163	142	109	78
	0.5	177	156	133	103	72
	0.6	169	147	126	97	68
	0.7	160	139	118	90	62
	0.8	152	131	110	84	57
	0.9	144	123	102	77	52
	1.0	135	114	94	70	47
0.5	0.5	168	148	128	99	70
	0.6	160	140	120	92	65
	0.7	152	132	112	86	60
	0.8	144	124	104	80	55
	0.9	135	116	96	73	50
	1.0	126	107	88	66	45
0.6	0.6	152	134	115	89	63
	0.7	144	126	108	83	58
	0.8	135	117	99	76	52
	0.9	127	109	91	69	47
	1.0	118	100	83	62	42

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
0.7	0.7	135	119	102	79	55
	0.8	127	110	94	72	50
	0.9	118	102	85	65	45
	1.0	109	94	77	59	39
0.8	0.8	118	103	88	68	47
	0.9	108	94	80	61	42
	1.0	100	86	72	54	36
0.9	0.9	101	88	75	57	39
	1.0	92	79	67	50	34
1.0	1.0	84	72	61	46	31
ЖОВТЕНЬ						
0	0.0	207	165	123	77	31
	0.1	200	159	118	74	30
	0.2	192	153	112	71	29
	0.3	185	146	107	67	27
	0.4	177	139	102	64	26
	0.5	168	132	96	60	25
	0.6	161	126	91	58	24
	0.7	153	120	86	54	23
	0.8	145	113	80	51	21
	0.9	137	106	74	47	20
	1.0	129	99	69	44	19
0.1	0.1	194	155	114	72	30
	0.2	186	148	109	69	28
	0.3	179	141	104	65	27
	0.4	170	135	99	62	26
	0.5	162	127	93	59	25
	0.6	155	121	88	56	23
	0.7	147	115	83	52	22
	0.8	139	108	77	49	20
	0.9	131	101	72	45	19
	1.0	123	95	66	42	18
0.2	0.2	180	143	107	67	28
	0.3	172	136	101	63	26
	0.4	164	130	96	60	25
	0.5	156	123	91	57	24
	0.6	148	117	85	54	22
	0.7	141	110	80	50	21
	0.8	133	103	74	47	20

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.9	125	96	68	43	18
	1.0	116	89	63	40	17
0.3	0.3	166	132	98	62	26
	0.4	157	125	93	59	25
	0.5	150	119	87	55	23
	0.6	142	112	82	52	22
	0.7	134	106	77	48	20
	0.8	127	98	71	45	19
	0.9	118	91	65	41	17
	1.0	110	85	60	37	16
0.4	0.4	152	121	90	57	24
	0.5	144	114	84	54	23
	0.6	136	108	79	50	21
	0.7	128	101	73	47	20
	0.8	120	94	68	43	18
	0.9	112	87	62	39	16
	1.0	104	80	56	36	15
0.5	0.5	138	109	82	52	22
	0.6	130	103	76	48	20
	0.7	122	96	71	45	19
	0.8	114	90	65	41	17
	0.9	106	83	59	37	15
	1.0	98	75	53	34	14
0.6	0.6	123	98	73	46	19
	0.7	116	92	67	42	18
	0.8	108	85	62	39	16
	0.9	100	78	56	35	14
	1.0	92	71	50	32	13
0.7	0.7	109	87	64	41	17
	0.8	102	80	59	37	15
	0.9	94	73	53	34	14
	1.0	86	66	47	30	12
0.8	0.8	95	75	55	35	15
	0.9	87	69	50	31	12
	1.0	80	61	44	27	11
0.9	0.9	82	64	47	29	12
	1.0	73	57	41	26	11
1.0	1.0	67	52	38	24	9

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Листопад						
0	0.0	162	114	66	35	2.9
	0.1	156	109	63	33	2.9
	0.2	148	105	61	32	2.9
	0.3	142	100	59	31	2.4
	0.4	135	96	56	29	2.4
	0.5	129	91	53	28	2.4
	0.6	122	86	50	26	2.4
	0.7	116	82	47	25	2.4
	0.8	109	77	44	23	1.9
	0.9	102	71	40	21	1.9
	1.0	96	66	37	19	1.9
0.1	0.1	151	107	62	33	2.9
	0.2	144	102	60	31	2.9
	0.3	138	98	57	30	2.9
	0.4	131	93	54	28	2.4
	0.5	124	87	51	27	2.4
	0.6	118	83	48	25	2.4
	0.7	111	78	45	24	2.4
	0.8	105	73	42	22	2.4
	0.9	98	68	38	20	1.9
	1.0	91	63	38	18	1.9
0.2	0.2	140	99	58	30	2.9
	0.3	133	95	56	29	2.9
	0.4	127	90	53	28	2.9
	0.5	120	85	50	26	2.4
	0.6	114	81	48	25	2.4
	0.7	107	75	44	23	2.4
	0.8	100	70	40	21	2.4
	0.9	94	65	26	19	1.9
	1.0	87	60	33	17	1.9
	0.3	0.3	129	92	54	28
0.4		122	87	51	27	2.4
0.5		116	83	48	25	1.9
0.6		109	77	45	24	1.9
0.7		103	72	42	22	1.9
0.8		96	67	38	20	1.9
0.9		89	62	35	18	1.4
1.0		83	57	32	16	1.4

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
Листопад						
0.4	0.4	118	84	49	26	2.4
	0.5	111	79	47	25	2.4
	0.6	105	79	44	23	1.9
	0.7	98	70	40	21	1.9
	0.8	92	63	37	19	1.9
	0.9	85	59	34	17	1.4
	1.0	78	54	30	15	1.4
0.5	0.5	108	76	45	24	1.9
	0.6	100	72	42	22	1.9
	0.7	94	67	39	20	1.9
	0.8	87	61	35	18	1.4
	0.9	80	56	32	16	1.4
	1.0	74	51	28	15	1.4
0.6	0.6	96	68	40	21	1.9
	0.7	89	63	37	19	1.9
	0.8	83	58	34	18	1.9
	0.9	76	53	30	16	1.4
	1.0	69	48	27	14	1.4
0.7	0.7	85	60	36	19	1.9
	0.8	78	55	32	17	1.4
	0.9	72	50	28	15	1.4
	1.0	65	45	25	13	0.96
0.8	0.8	74	52	31	16	1.4
	0.9	67	47	27	14	0.96
	1.0	60	41	23	12	0.96
0.9	0.9	62	44	25	13	0.96
	1.0	56	38	22	12	0.96
1.0	1.0	51	36	20	11	0.96
Грудень						
0	0.0	144	92	45	19	0
	0.1	133	88	43	18	0
	0.2	128	84	41	18	0
	0.3	122	81	39	17	0
	0.4	116	77	37	16	0
	0.5	110	73	36	15	0
	0.6	105	69	34	14	0
	0.7	98	65	31	14	0
	0.8	93	61	29	13	0

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.9	86	57	27	12	0
	1.0	81	53	25	12	0
0.1	0.1	130	85	42	17	0
	0.2	124	82	40	17	0
	0.3	118	78	38	16	0
	0.4	112	74	36	15	0
	0.5	107	71	35	15	0
	0.6	101	67	33	14	0
	0.7	95	62	30	13	0
	0.8	89	59	28	13	0
	0.9	83	54	26	12	0
	1.0	77	50	24	12	0
0.2	0.2	120	80	39	15	0
	0.3	114	76	37	15	0
	0.4	109	72	36	14	0
	0.5	103	68	34	13	0
	0.6	97	64	32	13	0
	0.7	91	60	29	12	0
	0.8	85	56	27	12	0
	0.9	79	52	25	12	0
	1.0	73	48	22	11	0
	0.3	0.3	111	73	36	15
0.4		105	70	35	14	0
0.5		99	66	33	14	0
0.6		94	62	31	13	0
0.7		87	53	28	12	0
0.8		82	54	26	12	0
0.9		76	49	24	11	0
1.0		69	45	21	9.6	0
0.4	0.4	101	67	33	14	0
	0.5	96	63	32	13	0
	0.6	90	60	29	12	0
	0.7	84	55	27	12	0
	0.8	78	51	25	11	0
	0.9	72	48	23	9.6	0
	1.0	66	43	20	8.6	0
0.5	0.5	92	61	30	14	0
	0.6	86	57	28	13	0
	0.7	80	53	26	12	0

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7
	0.8	74	49	24	11	0
	0.9	68	45	22	9.1	0
	1.0	62	41	19	8.2	0
0.6	0.6	83	55	27	13	0
	0.7	77	51	25	12	0
	0.8	71	47	23	11	0
	0.9	64	42	20	9.1	0
	1.0	58	38	18	7.7	0
0.7	0.7	73	48	24	12	0
	0.8	67	44	22	11	0
	0.9	60	40	19	9.1	0
	1.0	55	36	17	7.2	0
0.8	0.8	63	42	20	9.6	0
	0.9	57	38	18	8.2	0
	1.0	51	33	16	6.2	0
0.9	0.9	53	36	17	7.7	0
	1.0	47	31	14	5.3	0
1.0	1.0	43	28	13	4.3	0

Таблиця 1.2 - Значення коефіцієнту b_1

Абсолютна вологість повітря, e_{200} , мб	Загальна хмарність N_z , балів									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0.1	0.53	0.48	0.42	0.37	0.32	0.26	0.21	0.16	0.11	0.05
0.2	0.57	0.51	0.46	0.40	0.34	0.29	0.23	0.17	0.11	0.06
0.3	0.60	0.54	0.48	0.42	0.36	0.30	0.24	0.18	0.12	0.06
0.4	0.62	0.55	0.49	0.43	0.37	0.31	0.25	0.18	0.12	0.06
0.5	0.63	0.56	0.50	0.44	0.38	0.31	0.25	0.19	0.13	0.06
0.6	0.64	0.57	0.51	0.45	0.38	0.32	0.26	0.19	0.13	0.06
0.7	0.65	0.59	0.52	0.46	0.39	0.33	0.26	0.20	0.13	0.07
1.0	0.67	0.60	0.53	0.47	0.40	0.33	0.27	0.20	0.13	0.07
1.2	0.68	0.61	0.54	0.48	0.41	0.34	0.27	0.20	0.14	0.07
1.5	0.69	0.62	0.55	0.48	0.42	0.35	0.28	0.21	0.14	0.07
2.0	0.71	0.64	0.57	0.50	0.43	0.35	0.28	0.21	0.14	0.07
3.0	0.73	0.66	0.58	0.51	0.44	0.37	0.29	0.22	0.15	0.07
4.0	0.75	0.67	0.60	0.52	0.45	0.37	0.30	0.22	0.15	0.07
5.0	0.76	0.68	0.61	0.53	0.46	0.38	0.30	0.23	0.15	0.08
6.0	0.77	0.69	0.62	0.54	0.46	0.38	0.31	0.23	0.15	0.08
8.0	0.78	0.71	0.63	0.55	0.47	0.39	0.31	0.24	0.16	0.08
10.0	0.79	0.72	0.64	0.56	0.48	0.40	0.32	0.24	0.16	0.08
12.0	0.80	0.72	0.64	0.56	0.48	0.40	0.32	0.24	0.16	0.08
15.0	0.81	0.73	0.65	0.57	0.49	0.41	0.33	0.24	0.16	0.08
20.0	0.83	0.74	0.66	0.58	0.50	0.41	0.33	0.25	0.17	0.08
25.0	0.84	0.75	0.67	0.59	0.50	0.42	0.33	0.25	0.17	0.08
30.0	0.84	0.76	0.68	0.59	0.51	0.42	0.34	0.25	0.17	0.08

Примітка. При $N_z=1$ (суцільна хмарність) $b_1=0$

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнту b_2

Загальна хмарність N_3 , балів	Загальна хмарність N_3 , балів											
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	
0.0	0.00											
0.1	0.08	0.10										
0.2	0.17	0.18	0.19									
0.3	0.25	0.26	0.28	0.29								
0.4	0.34	0.35	0.36	0.37	0.39							
0.5	0.42	0.44	0.45	0.46	0.47	0.48						
0.6	0.51	0.52	0.53	0.54	0.56	0.57	0.58					
0.7	0.60	0.61	0.62	0.63	0.64	0.65	0.56	0.67				
0.8	0.68	0.69	0.70	0.71	0.73	0.74	0.75	0.76	0.78			
0.9	0.76	0.77	0.78	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.84	0.85		
1.0	0.85	0.86	0.87	0.88	0.90	0.91	0.92	0.94	0.95	0.96	0.97	

Таблиця 1.4 - Значення σT^4 , Вт/м² (позитивна температура)

Темпе- ратура, °C	Десяті частки градуса									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	321	321	322	322	322	323	323	323	324	324
1	324	326	326	326	327	327	328	328	329	329
2	330	330	330	331	333	333	334	334	334	335
3	335	335	336	336	336	337	337	338	338	340
4	340	340	341	341	341	342	342	343	344	344
5	344	344	345	345	345	347	347	348	348	349
6	349	350	350	351	351	351	352	352	353	354
7	355	355	356	356	357	358	358	358	359	359
8	359	361	361	362	363	363	363	363	363	364
9	365	365	366	366	366	367	368	369	370	370
10	370	371	371	372	372	373	374	374	374	375
11	376	377	377	377	378	379	379	379	380	380
12	381	382	383	383	384	384	385	385	386	386
13	386	387	387	388	388	389	390	391	391	391
14	392	392	393	393	393	394	394	395	396	397
15	397	397	398	398	399	399	400	401	401	401
16	402	403	404	404	405	405	406	406	407	407
17	408	408	409	411	411	412	412	412	413	413
18	414	414	415	416	417	418	418	418	419	419
19	420	420	421	421	422	422	422	423	424	424
20	426	426	426	427	428	428	428	429	429	430
21	430	431	432	433	433	434	434	435	435	436
22	437	437	438	439	440	441	441	442	442	443
23	443	443	444	445	445	446	447	448	448	449
24	449	450	450	451	452	452	452	453	454	455
25	455	456	457	457	458	458	459	459	460	461
26	462	462	463	463	464	464	465	465	466	466
27	467	468	469	470	470	471	471	472	472	473
28	473	474	475	476	477	477	477	478	478	478
29	479	480	481	482	483	484	484	485	485	486

Продовження таблиці 1.4
(негативна температура)

Темпе- ратура, °С	Десяті частки градуса									
	0	- 0.1	- 0.2	- 0.3	- 0.4	- 0.5	- 0.6	- 0.7	- 0.8	- 0.9
- 0	318	317	316	316	316	315	314	314	313	313
- 1	313	313	312	312	312	311	310	310	309	309
- 2	308	308	307	307	306	306	306	306	305	305
- 3	304	304	303	302	302	302	301	301	300	300
- 4	299	298	298	298	298	297	297	296	296	295
- 5	295	294	294	294	293	293	292	292	292	292
- 6	290	290	290	289	289	289	288	288	287	287
- 7	286	286	286	285	285	284	284	283	283	282
- 8	282	282	281	281	280	280	279	279	278	278
- 9	278	277	277	276	276	276	276	275	275	274
- 10	274	273	273	272	272	272	271	271	270	270

Таблиця 1.5 - Значення тепловіддачі дна $S_{дн}$ (Вт/м²)

Місяць	Градуси північної широти	Десяті частки градуса				
		0 - 5	10	15	20	30
Квітень	30	-20	-17	-15	-13	0
	40	-14	-13	-13	-9	0
	50	-7	-6	-6	-5	0
	60	0	0	0	0	0
	70	2	2	2	1	0
Травень	30	-16	-14	-13	-10	0
	40	-16	-14	-13	-10	0
	50	-15	-14	-12	-10	0
	60	-14	-13	-12	-9	0
	70	-9	-9	-8	-6	0
Червень	30	-15	-14	-12	-10	0
	40	-16	-14	-13	-10	0
	50	-16	-14	-13	-12	0
	60	-16	-14	-13	-12	0
	70	-17	-15	-13	-12	0

Продовження таблиці 1.5

Місяць	Градуси північної широти	Десяті частки градуса				
		0 - 5	10	15	20	30
Липень	30	-10	-9	-8	-7	0
	40	-10	-9	-8	-7	0
	50	-12	-10	-9	-8	0
	60	-12	-10	-9	-8	0
	70	-12	-12	-10	-8	0
Серпень	30	-5	-5	-3	-3	0
	40	-5	-5	-3	-3	0
	50	-5	-3	-3	-2	0
	60	-3	-3	-2	-2	0
	70	-3	-3	-2	-2	0
Вересень	30	2	2	2	1	0
	40	3	2	2	2	0
	50	5	3	3	2	0
	60	5	5	5	3	0
	70	6	6	5	5	0
Жовтень	30	14	13	12	9	0
	40	14	12	10	8	0
	50	12	10	9	8	0
	60	12	9	8	7	0
	70	10	9	8	7	0
Листопад	30	16	14	13	10	0
	40	15	13	13	10	0
	50	13	12	10	8	0
	60	12	10	9	8	0
	70	9	9	8	6	0
Грудень	30	17	15	14	12	0
	40	14	12	10	9	0
	50	10	9	8	7	0
	60	7	6	6	5	0
	70	5	3	3	2	0

Таблиця 1.6 - Значення $t_{o,y}$ в залежності від Φ (Вт/м²) при $\omega_{200} = 4$ м/с
та $L_{cp} = 5$ км

$t_{o,y}$	Десяті частки градуса									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
-10	218									
-9	235	234	232	230	228	227	225	223	222	220
-8	252	250	249	247	245	244	242	241	239	237
-7	269	268	266	264	262	261	259	257	256	254
-6	286	284	283	281	279	277	276	274	273	271
-5	301	299	298	296	295	293	292	290	289	288
-4	320	318	316	314	312	310	308	306	305	303
-3	335	333	332	330	329	327	326	324	323	322
-2	354	352	350	348	346	344	342	340	338	337
-1	373	371	369	368	366	364	362	360	358	356
0	393	391	389	387	385	383	381	379	377	375
0	393	394	396	399	401	403	404	406	408	410
1	412	414	416	418	420	422	424	426	428	430
2	432	434	436	438	439	441	443	445	447	449
3	451	453	455	458	460	462	464	467	468	470
4	473	475	477	479	480	483	484	486	488	490
5	492	495	497	499	504	503	505	507	510	512
6	514	516	519	521	524	526	529	531	533	536
7	538	540	543	545	547	549	551	554	556	558
8	560	563	565	567	570	572	575	577	580	582
9	584	587	590	593	595	598	600	603	604	608
10	611	614	616	618	621	623	626	628	630	633
11	635	638	641	643	646	649	651	654	657	660
12	662	664	667	670	673	675	678	681	683	686
13	689	692	694	696	699	702	705	707	710	713
14	715	718	721	724	727	730	733	736	739	742
15	744	747	750	753	755	758	760	763	766	768
16	771	774	777	780	784	787	790	793	796	799
17	803	806	809	812	815	819	822	824	828	831
18	834	837	840	844	847	850	853	857	859	862
19	866	869	872	876	879	882	886	889	893	896
20	900	903	907	910	914	918	921	925	929	932
21	936	939	943	946	950	953	956	960	963	967
22	970	974	978	982	986	989	993	997	1001	1005
23	1009	1013	1016	1019	1023	1027	1031	1034	1038	1042
24	1045	1050	1053	1057	1062	1066	1070	1074	1078	1082
25	1086	1090	1095	1098	1103	1107	1111	1116	1119	1123

Продовження таблиці 1.6

$t_{o,y}$	Десяті частки градуса									
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
26	1128	1132	1136	1141	1145	1149	1154	1158	1162	1167
27	1171	1176	1180	1183	1188	1192	1196	1200	1204	1209
28	1212	1217	1222	1227	1232	1237	1242	1246	1251	1256
29	1261	1266	1271	1276	1280	1285	1290	1295	1300	1305
30	1310	1314	1319	1324	1329	1334	1339	1343	1348	1353

Б. Розрахунок температури води водойми з $L_{сер} = 5$ км, $\omega_{200} = 4$ м/с та глибиною, яка дорівнює глибині реальної водойми.

1. Визначають початкову t_n та кінцеву t_k температури поверхні води за кожен місяць безльодоставного періоду.

Початкова температура води першого розрахункового місяця в перший день після очищення водойми від льоду навесні $t_n = 2.5^\circ\text{C}$. Якщо розрахунок приносять для незамерзаючої водойми, t_n приймається по аналогії з іншими у даному районі незамерзаючими водоймами. При відсутності даних розрахунок температури поверхні води треба починати з липня, приймаючи за початкове значення сталої температури за червень.

Кінцеву температуру поверхні води за розрахунковий інтервал часу обчислюють за формулою:

$$t_k = t_n + (t_y - t_n)k_k + \Delta t_k, \quad (1.10)$$

де k_k - коефіцієнт, який залежить від добутку коефіцієнта μ (характеристика відношення середньої по вертикалі до поверхневої температури) на середню глибину водойми H , тобто μH і від величини t_y , що визначається за рис. 1.1(а); Δt_k - поправка, яка залежить також від μH та інтенсивності зміни сталої температури води Δt_y даного місяця, визначається за рис. 1.1(б).

Значення μH визначаються за рис. 1.2 по лінії, яка відповідає середній глибині водойми у залежності від довжини розгону повітряного потоку над реальною водоймою. У тих випадках, коли глибина водойми більше, ніж визначно на графіку, значення μH визначається з кривої у точці, яка відповідає даній довжині розгону.

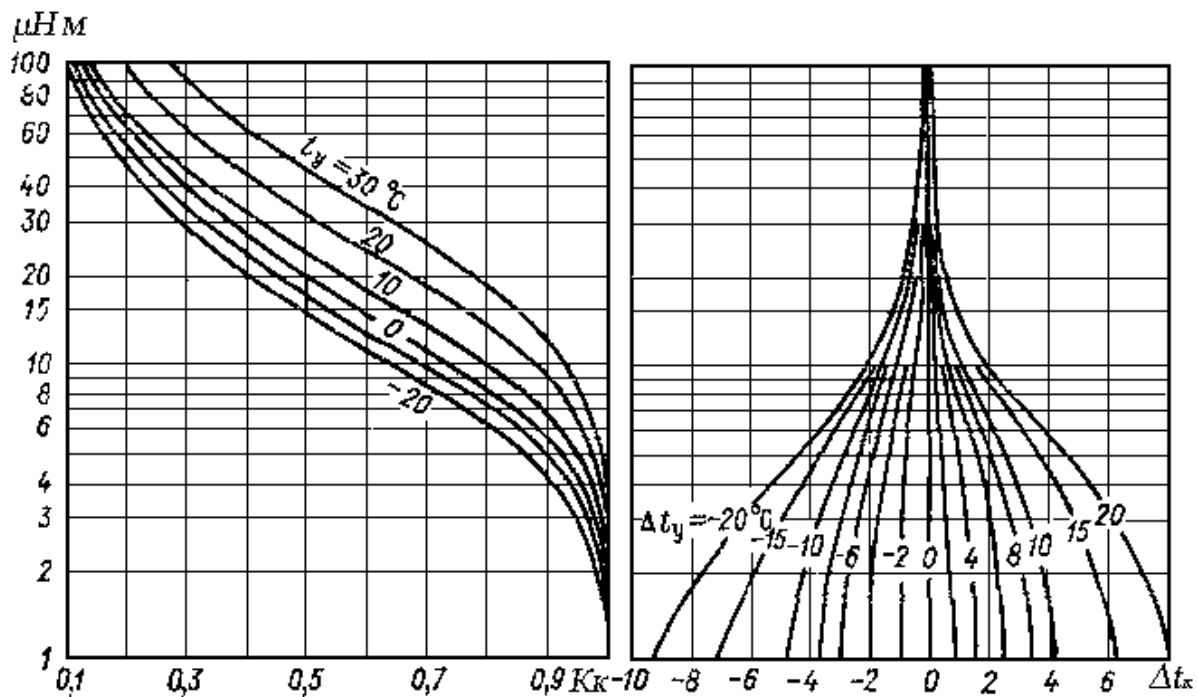


Рисунок 1.1 (а,б) Графіки $k_k = f(\mu H)$ та $\Delta t_k = f(\mu H)$.

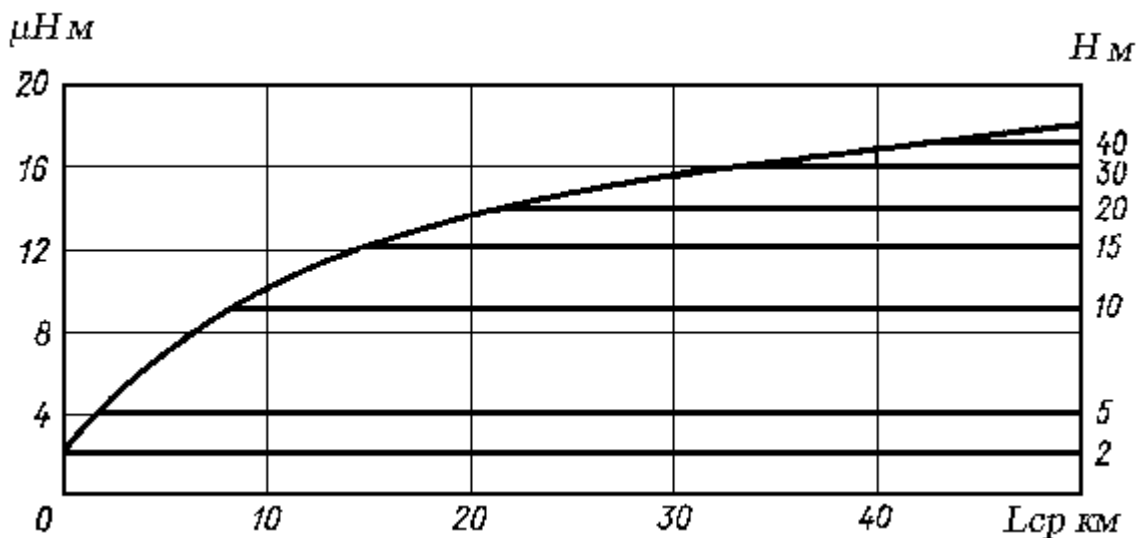


Рисунок 1.2 Залежність μH від середньої глибини та довжини розгону повітряного потоку над водоймою.

Інтенсивність зміни сталої температури води для даного місяця обчислюють за формулою

$$\Delta t_y = \frac{t_{y(n+1)} - t_{y(n-1)}}{2}, \quad (1.12)$$

де $t_{y(n+1)}$ та $t_{y(n-1)}$ - стала температура води відповідно дальшого та попереднього місяця.

Розрахунок температури води виконується послідовно від місяця до місяця. Для подальших місяців t_n приймається рівною t_k попереднього місяця.

2. Середню місячну температуру поверхні води для водойми з $L_{сер} = 5$ км, сталою швидкістю вітру $\omega_{200} = 4$ м/с та при фактичній середній глибині обчислюють за формулою

$$t_{сер} = t_n + (t_y - t_n)k_{сер} + \Delta t_{сер}, \quad (1.13)$$

де значення $k_{сер}$ та $\Delta t_{сер}$ визначають за рис. 1.3 в залежності від t_y , μH та Δt_y .

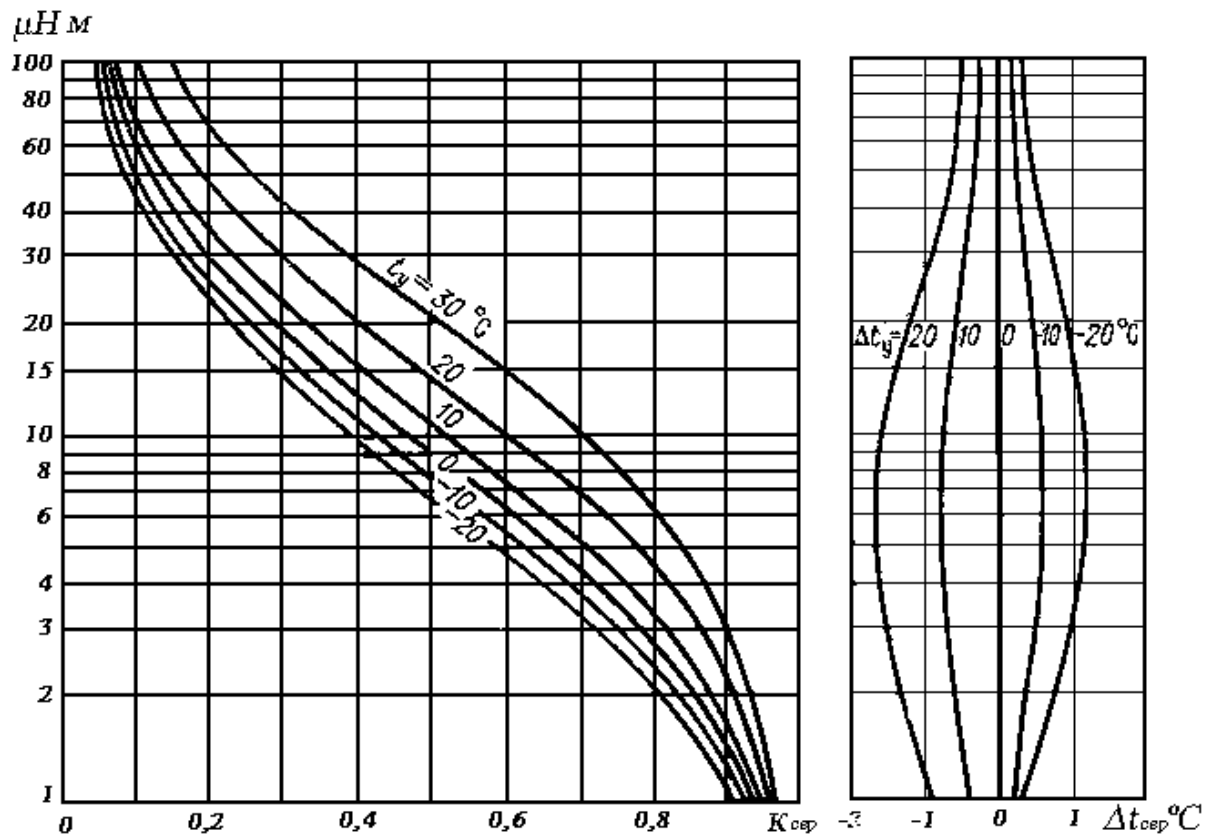


Рисунок 1.3 – Графіки $k_{сер} = f(\mu H)$ та $\Delta t_{сер} = f(\mu H)$.

Якщо дати очищення водойми від льоду навесні та замерзання його восени не співпадають з початком або кінцем місяця, при розрахунку t_k та $t_{сер}$ значення t_y приймають за неповний місяць. Середні за періоди від дати скресання водойми до кінця місяця і від початку місяця до дати

замерзання значення t_y визначають графічною інтерполяцією між середніми місячними значеннями по трьох точках – за попередній, теперішній та подальший місяці. Аналогічно визначають за неповні місяці і значення θ'_{200} та e'_{200} . Значення μH , Δt_k та $\Delta t_{сер}$ за періоди менше, ніж місяць, наприклад за n діб, визначають як добуток їх місячних значень на $30.4/n$, для μH і на $n/30.4$ для Δt_k та $\Delta t_{сер}$.

Приклад розрахунку

Проектують водосховище з площею водного дзеркала 80 км^2 і середньою глибиною 7 м . Широта центру водосховища 52° п.ш. Треба визначити температуру поверхні води водосховища.

Метеостанція розташована біля великого селища на відкритій місцевості. Середня дата скресання водойми даного району – $10.IV$, замерзання – $23.IX$.

Середня довжина розгону $L_{сер} = 8.5 \text{ км}$.

1. За формулами 1.6-1.9 розраховують сталу температуру води для умовної водойми при $L_{сер} = 5 \text{ км}$, $\omega_{200} = 4 \text{ м/с}$ та глибині, що прямує до нуля.

Розрахунок записують в табл. 1.7.

2. Визначають значення t_y , θ'_{200} та e'_{200} для неповних місяців на початку і наприкінці сезону з допомогою графічної інтерполяції.

Маємо такі значення:

	t_y	θ'_{200}	e'_{200}
11-30.IV	8.6	7.0	7.5
1-23.XI	0.7	-0.2	5.5

Значення t_y записують в табл. 1.7.

2. Розраховують $t_{сер}$ для водойми глибиною 7 м . Значення μH визначають за рис. 2. $\mu H = 6.0 \text{ м}$.

3. Результати розрахунку записують у табл. 1.8

Таблиця 1.7 – Розрахунок t_y

Місяць	Дані спостережень на метеостанції (середні за багаторічний період)				b_1	b_2	σT_{200}^4	S_{ua}	S_p	$S_{дн}$	$a_3 \theta_{200}$	$a_6 e_{200}$	Φ	$t_{0,y}$	$t_{0,y} - \theta_{200}$	Δt	t_y
	θ_{200}	e_{200}	N_0	N_H													
III	-4.0	4.5	0.9	0.9	0.08	0.85	299	278	64	3	-34	58	369	-1.2	-2.8	-	-
IV	5.3	6.9	0.7	0.5	0.23	0.65	345	269	142	-7	45	89	538	7.0	1.7	0.39	0.81
V	14.2	10.5	0.6	0.3	0.32	0.54	393	338	225	-15	121	135	804	17.0	2.8	0.24	6.8
VI	17.8	13.6	0.6	0.4	0.32	0.56	413	364	212	-15	152	175	888	19.7	1.9	0.39	16.6
VII	20.1	15.7	0.5	0.3	0.41	0.46	426	371	218	-11	172	203	953	21.5	1.4	0.27	19.4
VIII	18.3	14.0	0.5	0.3	0.41	0.46	416	362	189	-4	156	181	883	19.5	1.2	0.20	21.3
IX	12.4	10.7	0.6	0.4	0.32	0.56	374	329	126	4	106	138	703	13.5	1.1	0.17	19.3
X	5.7	7.7	0.7	0.6	0.24	0.66	348	313	67	11	49	99	539	7.0	1.3	0.15	13.3
XI	-1.2	5.2	0.8	0.7	0.15	0.76	312	284	32	13	-10	67	386	-0.4	-0.8	0.18	6.8
XII	-7.0	3.5	0.9	0.9	0.07	0.85	286	266	17	10	-60	45	278	-6.5	-0.5	-	-
																0.11	0.29
																-	-
																007	6.43

Таблиця 1.8 – Розрахунок $t_{сер}$. Скресання – 10. IV, замерзання – 23. XI

Місяць або період	t_y	Δt_y	κ_k	t_n	$t_y - t_n$	$(t_y - t_n)\kappa_k$	Δt_k	t_k	$\kappa_{сер}$	$(t_y - t_n)\kappa_{сер}$	$\Delta t_{сер}$	$t_{сер}$
III	-0.81											
I – 30. IV	6.8											
II – 30. IV	8.6	8.7	0.91	2.5	6.1	5.5	2.0	10.0	0.65	4.0	-0.6	5.9
V	16.6	6.3	0.94	10.0	6.6	6.2	1.1	17.3	0.70	4.6	-0.4	14.2
VI	19.4	2.4	0.95	17.3	2.1	2.0	0.5	19.8	0.72	1.5	-0.2	18.6
VII	21.3	-0.05	0.96	19.8	1.5	1.5	0	21.3	0.73	1.0	0	20.8
VIII	19.3	-4.0	0.95	21.3	-2.0	-2.0	-1.2	18.2	0.72	-1.4	0.2	20.1
IX	13.3	-6.2	0.94	18.2	-4.9	-4.9	-1.5	12.1	0.68	-3.3	0.4	15.3
X	6.8	-6.8	0.90	12.1	-5.3	-5.3	-1.7	5.6	0.63	-3.3	0.4	9.2
I – 30. XI	-0.29											
I – 23. XI	0.7	-6.6	0.89	5.6	-4.9	-4.9	-1.6	0	0.59	-2.9	0.4	3.1
XII	-6.43											

Література

1. Гопченко Є.Д., Крес Л.Є. Теплообмін у водних об'єктах. – Одеса, 1997 -103 с.
2. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. – Л., Гидрометеиздат, 1983 – 176 с.
3. Руководство по гидрологическим расчетам при проектировании водохранилищ. Л. Гидрометеиздат, 1983.

2 Розрахунок температури поверхні води методом суперпозиції

Метод суперпозиції [2] дозволяє розраховувати температуру води в озерах та водосховищах з урахуванням зміни у часі теплових умов на поверхні води та на дні, змінної за глибиною початкової температури, змінних у часі та за глибиною коефіцієнтів тепло- та температуропровідності, різного ступеня проточності тощо. Принцип суперпозиції полягає в тому, що складна теплова задача розкладається на прості таким чином, щоб сума значень початкової температури та теплових умов на поверхні води та на дні для додаткових задач дорівнювала би початковій температурі та тепловим умовам на поверхні та на дні в основній задачі. Для вирішення складної теплової задачі потрібно мати набір рішень простих задач. Таких задач 19, їх рішення мають вигляд розрахункових графіків та таблиць. Рішення 19 задач дозволяють розраховувати температуру води в мілких та глибоких водоймах при відсутності льодяного покриву та при його наявності.

Розрахунок термічного режиму виконується на основі рішення диференціального рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + v \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\lambda}{C\rho} \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2.1)$$

де t - температура води; τ - час; v - поздовжня складова швидкості течії; λ - коефіцієнт теплопровідності; C - питома теплопровідність; ρ - густина води.

За ступенем проточності водосховища бувають слабопроточні та проточні [2].

Слабопроточні водосховища характеризуються відносно невеликими швидкостями течії.

Рівняння (2.1) для цих водосховищ має вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}, \quad (2.2)$$

де $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; a - коефіцієнт температуропровідності.

Для рішення рівняння (2.2) необхідні такі дані:

1. Розподіл температури за глибиною у початковий час: $t_{t=0} = f(\tau)$.
2. Зміна у часі теплових умов на поверхні води та на дні: $S = f(\tau)$.
3. Глибина водойми.

4. Значення коефіцієнтів λ , C , ρ .

У проточних водосховищах швидкість течії відносно велика і температура води на розрахунковій вертикалі залежить від температури на вище розташованій ділянці водосховища.

Для рішення рівняння (2.1) необхідні такі дані:

1. розподіл температури води по глибині на початковій вертикалі, яка розташована на відстані L від розрахункової:

$$L = \int v d\tau ; \quad (2.3)$$

2. теплові умови на поверхні води та на дні для ділянки водосховища довжиною L між початковою та розрахунковою вертикалями;

3. розподіл глибин водосховища на ділянці L ;

4. значення коефіцієнтів λ , C та ρ .

Водосховища відносяться до типу:

слабопроточних при

$$v < \frac{aL}{H^2} \cdot k_v, \quad (2.4)$$

проточних при

$$v > \frac{aL}{H^2} \cdot k_v \quad (2.5)$$

де v - швидкість течії; L - відстань між розрахунковою та початковою вертикалями; H - глибина водосховища; k_v - швидкісний коефіцієнт, який визначають за табл. 2.1

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнтів k_v

Bi	>50	50-10	10-4	4-1	1-0.6	0.6-0.4	<0.4
k_v	0.12	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.80

Bi - Критерій Біо

$$Bi = \frac{\alpha H}{\lambda}, \quad (2.6)$$

де λ - коефіцієнт тепловіддачі.

Наявність проточності водосховища залежить від співвідношення двох значень критеріїв Фур'є, які обчислюються для слабoprоточного водосховища F_0' та F_0'' :

$$F_0' = \frac{a\tau}{H^2}; \quad F_0'' = \int_0^L \frac{a}{\nu H^2} dx \quad (2.7)$$

$$k_v = \frac{F_0'}{F_0''}.$$

Якщо $0.9 \leq k_v \leq 1.1$, розрахунок виконується як для слабoprоточного водосховища.

За глибиною водосховища розділяють на три типи: мілкі, глибокі та дуже глибокі.

Мілкі водосховища характеризуються незначним перепадом температури по глибині і великою мінливістю у часі температури на всіх глибинах.

Глибокі водосховища відрізняються значною величиною перепаду температур за глибиною; температура поверхні води суттєво відрізняється від температури біля дна, яка змінюється у часі.

Дуже глибокі – перепад температур за глибиною дуже великий, але температура біля дна протягом часу розрахунку практично стала.

Розподіл водосховищ на типи по глибині виконується шляхом аналізу чисельних значень критеріїв Біо та Фур'є (таблиці 2.2 - 2.5).

Таблиця 2.2 – Типи водосховищ при вільній від льоду водній поверхні

Водосховища	Ознака		Критерій	
	Перепад температур за глибиною	Мінливість придонної температури	Bi	F_0
Мілкі	$\Delta t \approx 0$	$t_{\text{дн}} = \text{var}$	$Bi \leq 0.2$	-
Глибокі	$\Delta t \neq 0$	$t_{\text{дн}} = \text{var}$	$Bi > 0.2$	$F_0 \geq F_{0\text{кр}}$
Дуже глибокі	$\Delta t \neq 0$	$t_{\text{дн}} = \text{const}$	$Bi > 0.2$	$F_0 < F_{0\text{кр}}$

Таблиця 2.3 – Значення критерію $F_{0кр}$

Bi	∞	10	1	0.5	0.4	0.2
$F_{0кр}$	0.07	0.10	0.15	0.18	0.20	0.28

Таблиця 2.4 – Типи водосховищ при наявності льодяного покриття

Водосховища	Ознака		Критерій
	Тепловіддача ложа	Мінливість придонної температури	F_{01}
Мілкі	$\Delta t \approx 0$	$t_{дн} = var$	$F_0 \geq F_{01кр}$
Глибокі	$\Delta t \neq 0$	$t_{дн} = var$	$F_0 < F_{01кр}$
Дуже глибокі	$\Delta t \neq 0$	$t_{дн} = const$	Γ

Таблиця 2.5 – Значення критерію $F_{01кр}$

Bi	∞	10	2	1	0.6	0.4	0.3	0.2
$F_{01кр}$	0.6	0.75	1.2	1.6	2.4	3.0	4.0	5.0

Таблиці 2.2 та 2.3 - для вільної від льоду поверхні водосховищ, таблиці 2.4 та 2.5 – при наявності льоду на поверхні.

Джерела теплоти розділяють на два типи: 1) задана початкова температура (межові умови I роду); 2) задана кількість теплоти (межові умови II роду).

При рішенні гідротермічних задач сума початкових температур або теплових потоків на поверхні води та на дні для простих задач повинна дорівнюватися початковій температурі на поверхні або на дні в основній задачі. Коефіцієнти тепло- або температуропровідності, а також коефіцієнт тепловіддачі α в основній та складових задачах повинні бути однаковими.

В табл. 2.6 наведені прості (елементарні задачі, які частіше всього зустрічаються в практиці інженерних розрахунків, а на рис. 2.1-2.4 – розрахункові графіки для рішення цих задач.

Для кожної задачі побудовані графіки у безрозмірних координатах θ , F_0 , Bi та η .

F_0 , Bi та η - задані аргументи, а θ - шукана величина. η - відносна вертикальна координата, яка визначається за формулою:

$$\eta = \frac{z}{h}, \quad (2.8)$$

де h - глибина водойми, змінюється від нуля на поверхні води до одиниці біля дна. Відносна температура

$$\theta = \frac{t - t_n}{t_0 - t_n}, \quad (2.9)$$

де t_0 - початкова температура; t_n - температура поверхні води.

Якщо $t_n=0$, параметр θ - відношення температури в даній точці до початкової температури. Значення θ змінюється від одиниці при $F_0=0$ до нуля при $F_0 \rightarrow \infty$.

Завдання

Розрахувати температуру води при змінному у часі теплообміні з атмосферою.

Вихідні дані:

1. Глибина слабопроточного водосховища.
2. Теплові потоки у кожну декаду.
3. Коефіцієнти тепло- та температуропровідності.

Пояснення до завдання

1. Підібрати по таблиці 2.6 задачу, яка співпадає за умовами з вирішеною.

2. Виписати перелічені у графі 5 цієї таблиці необхідні для розрахунків аргументи F_0 та η та обчислити їх значення для заданого часу τ та глибини z . За розрахунковим графіком даної задачі (див. рис. 2.1-2.4) визначити значення параметра температури θ .

3. Обчислити розрахункову температуру за формулою графі 6 табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Умови гідротермічних задач і розрахункові графіки

№ задачі	№ рисунка	Схема	Межові умови	Вихідні аргументи	Розрахункова формула
1	2	3	4	5	6
1	2.1		$t _{\tau=0} = t_0$ $t _{z=0} = t_n$ $\frac{\partial t}{\partial z} _{z=H} = 0$	$F_0 = \frac{a\tau}{H^2}$ $\eta = \frac{z}{H}$	$t = t_n + (t_0 - t_n)$
2	2.2		$t _{\tau=0} = t_0$ $t _{z=0} = t_0 + b\tau$ $\frac{\partial t}{\partial z} _{z=H} = 0$	$F_0 = \frac{a\tau}{H^2}$ $\eta = \frac{z}{H}$	$t = t_0 + \theta \frac{bH^2}{a}$
3	2.3		$t _{\tau=0} = t_0$ $-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} _{z=0} = S$ $\frac{\partial t}{\partial z} _{z=H} = 0$	$F_0 = \frac{a\tau}{H^2}$ $\eta = \frac{z}{H}$	$t = t_0 + \theta \frac{SH}{\lambda}$

Продовження таблиці 2.6

№ задачі	№ рисунка	Схема	Межові умови	Вихідні аргументи	Розрахункова формула
1	2	3	4	5	6
4	2.4		$t _{\tau=0} = t_0$ $-\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \Big _{z=0} = S_0 \tau$ $\frac{\partial t}{\partial z} \Big _{z=H} = 0$	$F_0 = \frac{a\tau}{H^2}$ $\eta = \frac{z}{H}$	$t = t_0 + \theta \frac{S_0 H^3}{\lambda a}$

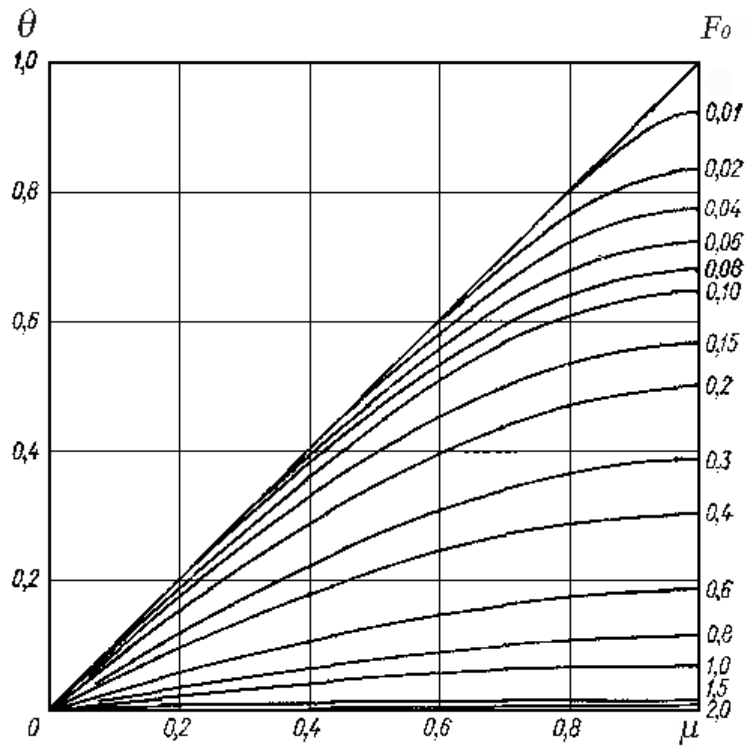


Рисунок 2.1 Розрахунковий графік елементарної задачі №1

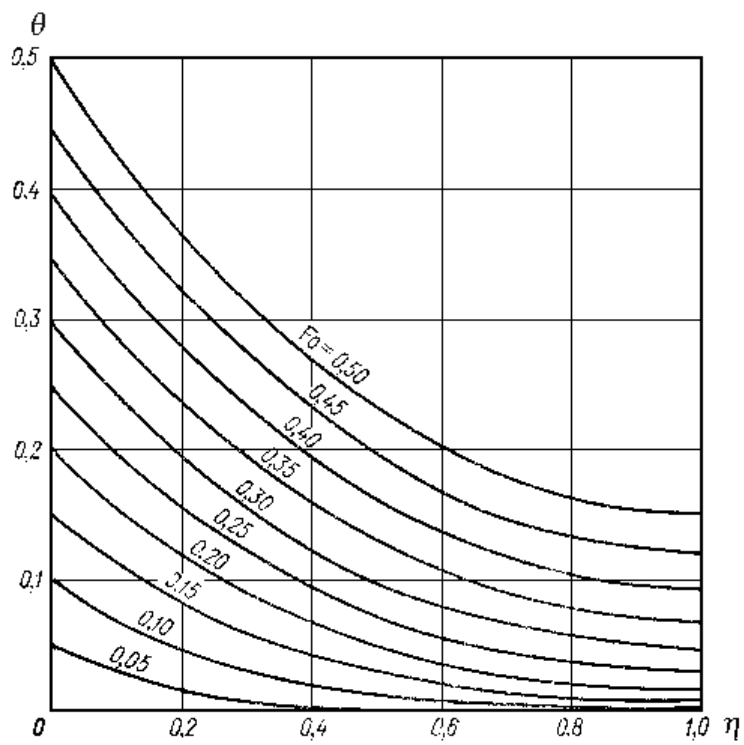


Рисунок 2.2 Розрахунковий графік елементарної задачі №2

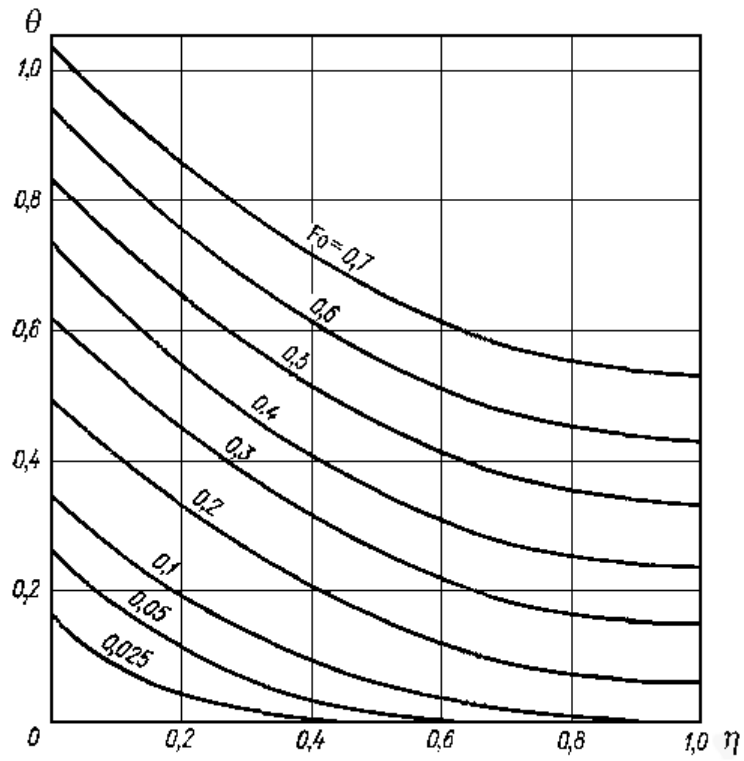


Рисунок 2.3 Розрахунковий графік елементарної задачі №3

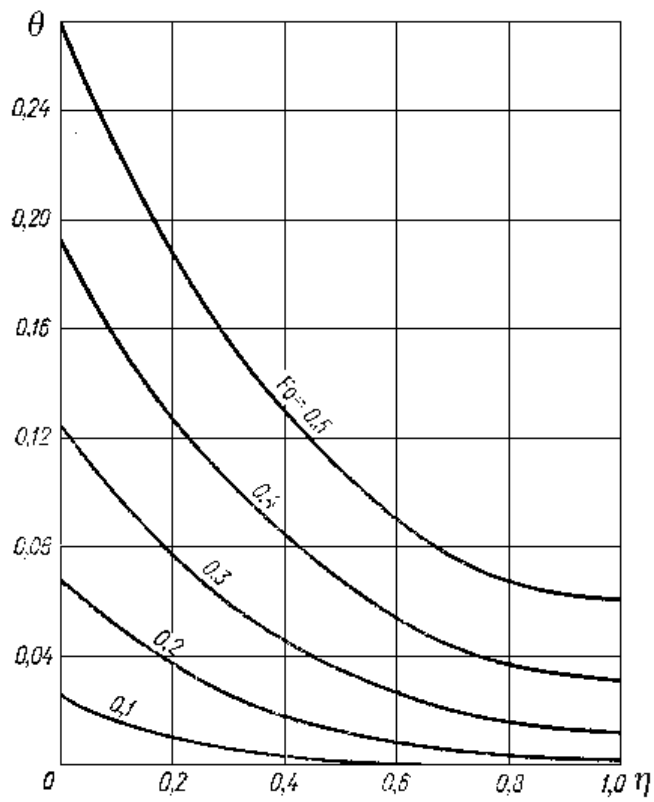


Рисунок 2.4 Розрахунковий графік елементарної задачі №4

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1. Глибина слабопроточного вільного від льоду водосховища $h = 50$ м.

2. Початкова температура однакова по глибині - $t_0 = 4^\circ \text{C}$.

3. Нагрівання води іде за рахунок теплообміну з атмосферою (рис. 2.5). Протягом першої декади $S_1 = 160 \text{ Вт/м}^2$; у другу швидкість зростання теплового потоку у другу декаду $S_0'' = 0.00011 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{с}$, в третю - $S_0'' = 0.00005 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{с}$.

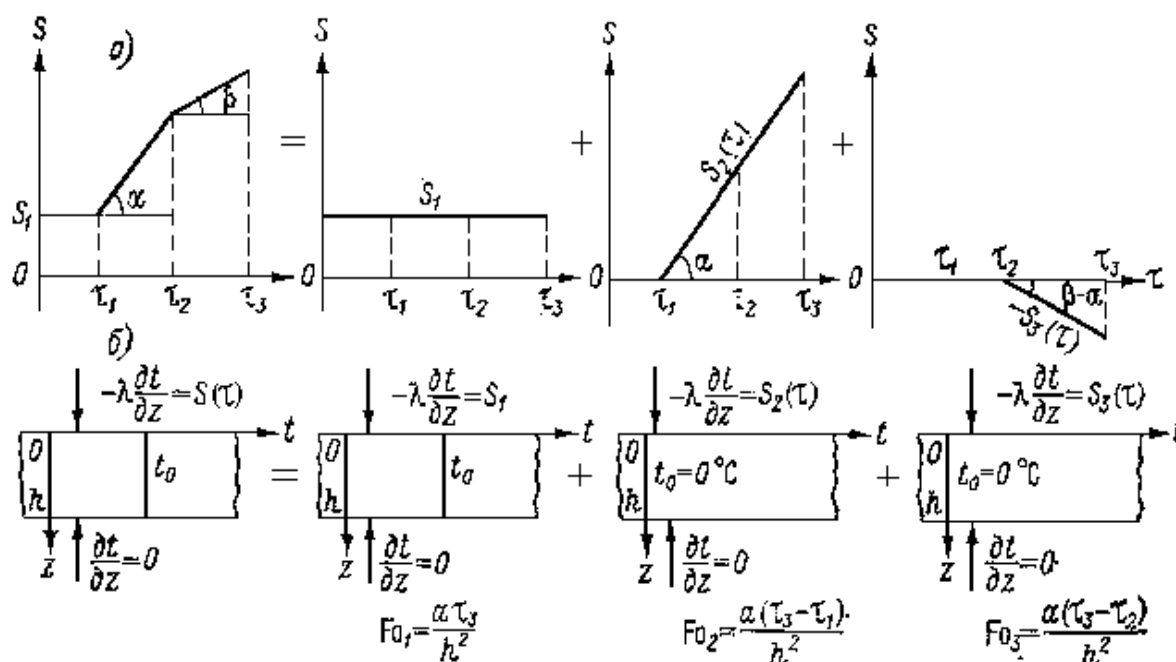


Рисунок 2.5 - Схема рішення задачі при змінному в часі теплообміні з атмосферою.

4. Коефіцієнт теплопровідності $\lambda = 100 \text{ Вт/м}\cdot\text{к}$, $a = 0.00028 \text{ м}^2 \cdot \text{с}$.

Порядок виконання роботи

Розрахувати розподіл температури по глибині наприкінці третьої декади ($\tau_3 = 30 \cdot 86400 \text{ с}$).

1. Підібрати за табл. 2.6 задачу з подібними умовами не вдається. Тому її рішення треба знаходити як суму рішень елементарних задач.

2. Тепловий потік на поверхні води розкладається на три джерела. Перший - $S_1 = 160 \text{ Вт/м}^2$ діє протягом всього розрахункового періоду

$\tau_3 = 30 \cdot 86400$. Друге джерело діє протягом двох декад $\tau_3 - \tau_1 = 20 \cdot 86400$ і дорівнює $S_2(\tau) = S'_0 \cdot \tau = 0.00011 \text{ Вт/м}^2$. третє джерело діє протягом третьої декади $\tau_3 - \tau_2 = 10 \cdot 86400 \text{ с}$, $S_3(\tau) = (S''_0 - S'_0) = -0.00006 \text{ Вт/м}^2$ (рис. 2.5а)

3. Початкову умову включаємо в першу задачу, тоді у другій та третій $t_0 = 0^\circ \text{ С}$.

4. За табл. 2.6 знаходимо, що перша задача збігається з задачею №3, а друга та третя задачі – з задачею №4.

5. Розрахункова формула для першої задачі має вигляд:

$$t_1 = t_0 + \theta_1 S_1 h / \lambda; \quad (2.10)$$

для другої задачі –

$$t_2 = \theta_2 S'_0 h^3 / (\lambda a); \quad (2.11)$$

для третьої задачі –

$$t_3 = \theta_3 (S''_0 - S'_0) h^3 / (\lambda a). \quad (2.12)$$

6. Розрахункова формула для шуканої температури:

$$t = t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.13)$$

7. Параметр температури θ_1 знаходимо за рис. 2.3, параметри θ_2 та θ_3 - за рис. 2.4.

8. Вихідні аргументи:
у першій задачі:

$$F_{01} = a \tau_3 / h^2 = 0.00028 \cdot 30 \cdot 86400 / 2500 = 0.29; \quad \eta = z / 50;$$

у другій задачі:

$$F_{02} = a(\tau_3 - \tau_1) / h^2 = 0.00028 \cdot 20 \cdot 86400 / 2500 = 0.19; \quad \eta = z / 50;$$

у третій задачі:

$$F_{03} = a(\tau_3 - \tau_2) / h^2 = 0.00028 \cdot 10 \cdot 86400 / 2500 = 0.096; \quad \eta = z / 50.$$

9. Результати розрахунку температури води наведені у табл. 2.7

Таблиця 2.7 – Розрахунок температури води за глибиною

Глибина		Перша задача		Друга задача		Третя задача		Шукана температура
z м	$\eta = \frac{z}{50}$	θ_1	t_1 °C	θ_2	t_2 °C	θ_3	t_3 °C	
0	0	0.61	8.88	0.069	3.38	0.024	- 0.64	11.62
10	0.2	0.44	7.52	0.037	1.81	0.009	- 0.24	9.09
20	0.4	0.31	6.48	0.018	0.88	0.004	- 0.11	7.25
30	0.6	0.22	5.76	0.008	0.39	0.002	- 0.05	6.10
40	0.8	0.16	5.28	0.004	0.20	0.001	- 0.03	5.45
50	1	0.14	5.12	0.003	0.15	0	0	5.27

Література

1. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. – Л., Гидрометеиздат, 1983. – 174 с.
2. Пехович А.И. Основы гидроледотермики. Л., Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.
3. Рекомендации по термическому расчету водохранилищ. Л., Энергия – 70 с.

3 Розрахунок дати початку льодоутворення на річках

Поява льоду на річках передусь швидке охолодження води за негативного теплового балансу. Перші ознаки льоду проявляються, коли температура поверхні річки знижується до 0 °С та нижче.

Для утворення льоду необхідні такі умови: 1) переохолодження води нижче 0 °С на соті долі градуса; 2) наявність ядер кристалізації; 3) винос теплоти, виділеної при кристалізації.

Льодоутворення на водній поверхні за Л.Г Шуляковським [2] починається при умові:

$$t_{сер} \leq -\frac{B_n}{\alpha_n}, \quad (3.1)$$

де $t_{сер}$ - середня у водному перерізі або по глибині температура води у момент початку льодоутворення на поверхні води;

B_n - питома тепловіддача водної поверхні;

α_n - коефіцієнт тепловіддачі водної маси до поверхні.

Температура води t_n на кінець n-го інтервалу часу обчислюється за формулою, наведеною в [2].

Коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою [2]:

$$\alpha = (0.000202v + 0.0000123\omega)\rho \cdot C, \quad (3.2)$$

де v - середня швидкість руху води на ділянці, м/с;

ω - швидкість вітру на висоті флюгера, м/с.

Питома тепловіддача водної поверхні B_n обчислюється за рівнянням:

$$B_n = S_{вк} + S_k + S_{эф}, \quad (3.3)$$

де $S_{вк}$ - втрата теплоти на випаровування;

S_k - турбулентний теплообмін з атмосферою шляхом конвекції, молекулярної та турбулентної теплопровідності за рахунок різниці температури води і повітря;

$S_{эф}$ - ефективне випромінювання.

Температура поверхні води дорівнює 0 °С. Величини $S_{вк}$, S_k , $S_{эф}$ обчислюються за формулами [1] або визначаються за номограмами (рис. 3.1, 3.2).

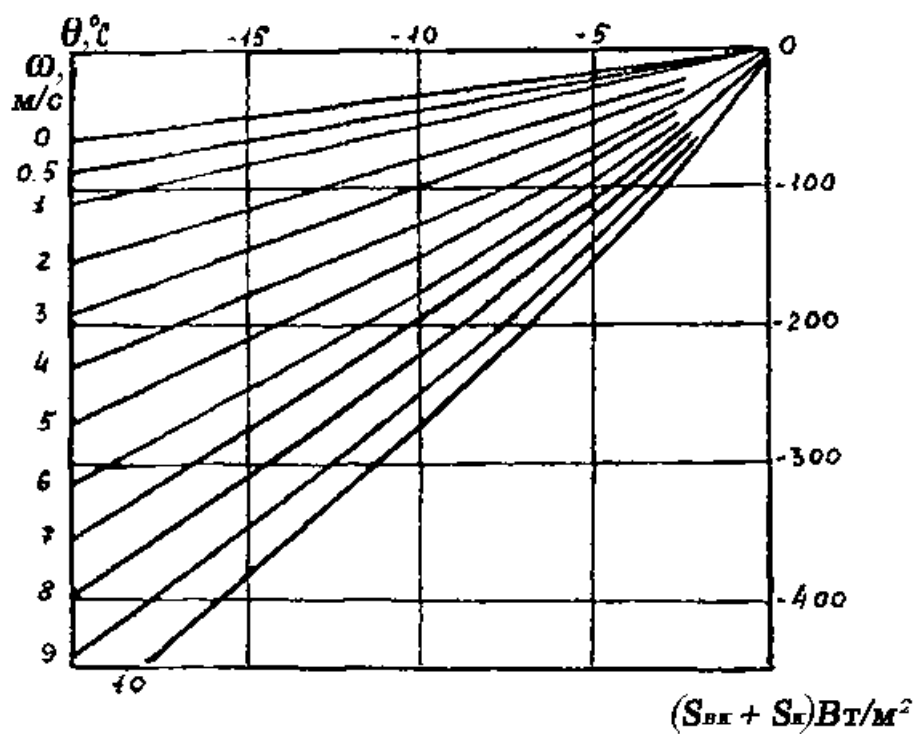


Рисунок 3.1 – Номограма для визначення суми втрати теплоти на випаровування і теплообміну з атмосферою при температурі поверхні води, рівній нулю градусів

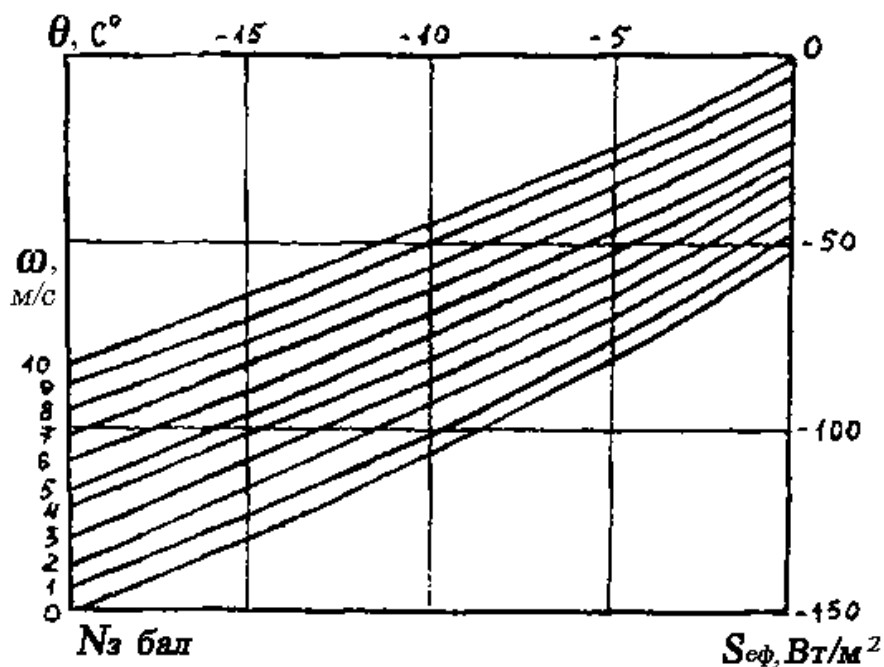


Рисунок 3.2 – Номограма для визначення ефективного випромінювання $S_{\text{эф}}$ при температурі поверхні води, рівній нулю градусів

Завдання

Визначити дату появи первинних льодяних утворень на річці.

Вихідні дані:

1. Метеорологічні дані: температура повітря θ , швидкість вітру ω , загальна хмарність N_z .
2. Середня швидкість руху води v .
3. Середня у перерізі температура води $t_{сер}$.

Пояснення до завдання

1. Задається орієнтовно дата початку льодоутворення. Якщо перший розрахунок покаже можливість початку льодоутворення на цю дату, треба повторити розрахунки у бік більш ранньої дати.

2. За формулою [1] обчислюється температура води на кінець n -го інтервалу часу.

3. За формулою (3.2) обчислюється коефіцієнт тепловіддачі α .

4. За номограмами (рис. 3.1, 3.2) визначається питома тепловіддача водної поверхні B_n .

5. За нерівністю (3.1) визначається можливість появи первинних льодяних утворень.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1. Метеорологічні дані на 20 жовтня, температура повітря $\theta = -2.7$ °С, швидкість вітру $\omega = 4.9$ м/с, хмарність загальна $N_z = 4$ бала.

2. Метеорологічні дані на 21 жовтня $\theta = -8.9$ °С, $\omega = 4.0$ м/с, $N_z = 4$ бала.

3. Середня швидкість руху води 20 жовтня - $v = 0.46$ м/с; 21 жовтня - $v = 0.44$ м/с.

4. Середня у перерізі температура води 20 жовтня $t_{20.X} = 0.3$ °С; 21 жовтня - $t_{21.X} = 0.1$ °С.

Порядок виконання роботи

Розрахунок дати появи первинних льодяних утворень здійснюється за методом послідовного наближення.

Визначимо дату появи льодоутворень – 20 жовтня.

1. Обчислюємо питому тепловіддачу водної поверхні $B_{20.X}$.

При $\theta = -2.7$ °C і $\omega = 4.9$ м/с за номограмою на рис 3.1 маємо:
 $S_{вк} + S_{к} = -53$ Вт/м².

При $N_3 = 4$ бала та $\theta = -2.7$ °C за номограмою на рис. 3.2 маємо -
 $S_{эф} = -45$ Вт/м²; $B_{20.X} = -98$ Вт/м². Знак «мінус» означає, що тепловий потік має напрям від водної поверхні в атмосферу.

2. Коефіцієнт тепловіддачі дорівнює:

$$\alpha_{20.X} = (0.000202 \cdot 0.46 + 0.0000123 \cdot 4.9) \cdot 4190 \cdot 1000 = 642 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}$$

3. Підставивши числові значення у формулу (3.1) маємо, що середня температура води у перерізі, при якій можливо льодоутворення на водній поверхні:

$$-\left(\frac{-98}{642}\right) = 0.15 \text{ °C}$$

Тому що $t_{20.X} = 0.3$ °C > 0.15 °C, льодоутворення 20 жовтня не можливо.

Аналогічні розрахунки виконуються на 21 жовтня:

1. $S_{вк} + S_{к} = -45$ Вт/м²; $S_{эф} = -74$ Вт/м²; $B_{21.X} = -119$ Вт/м².

2. $\alpha_{21.X} = 398$ Вт/м²·град.

3. За формулою (3.1)

$$-\left(\frac{-119}{398}\right) = 0.03 \text{ °C}$$

Тому, що $t_{21.X} = 0.1$ °C < 0.03 °C, льодоутворення 21 жовтня можливо.

Література

1. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 176 с.

2. Шуляковский Л.Г. Появление льда и начало ледостава на реках и водохранилищах. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 240 с.

4 Розрахунок теплопередачі від води до повітря крізь снігольодяний покрив

Водоймища покриті тришаровою снігольодяною товщею, що утримує шар снігу, який щойно випав, затверділого снігу та льоду (рис. 4.1)

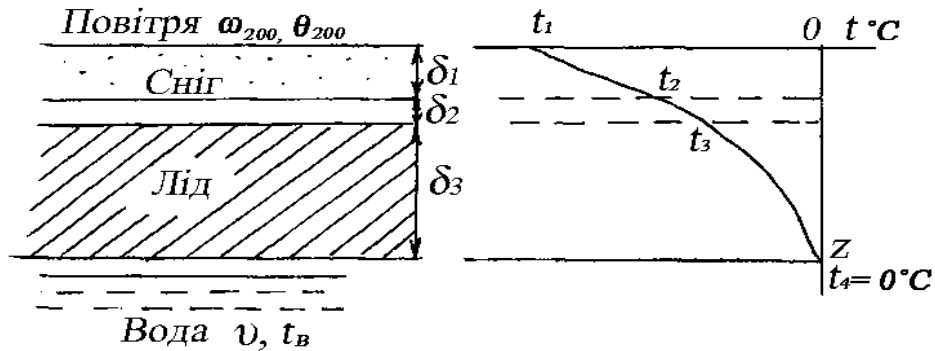


Рисунок 4.1 - Схема снігольодяної товщі та крива залежності $t = f(z)$

При припущенні, що у першій декаді січня спостерігається стаціонарний температурний режим, необхідно:

- 1) розрахувати питомий тепловий потік q крізь снігольодяну товщу;
- 2) розрахувати значення температури на границях розділу окремих шарів t_1, t_2, t_3 ;
- 3) побудувати графік розподілу температури $t = f(z)$.

Вихідні дані:

1. Товщина шару снігу, який щойно випав δ_1 , товщина шару затверділого снігу $\delta_2 = 0.05$ м, товщина льоду $\delta_3 = 0.20$ м.
2. Щільність відповідних шарів снігу: ρ_1 та $\rho_2 = 500$ кг/м³.
3. Метеорологічні дані: середньодекадні значення температури повітря θ та швидкості вітру ω на висоті 2 м у першій декаді січня.
4. Температура води під льодом $t_e = 0.5$ °С, швидкість течії $v = 0.1$ м/с.

Пояснення до задачі

Питомий тепловий потік (Вт/м²) визначається за формулою:

$$q = \frac{t_e - \theta}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (4.1)$$

де t_g - температура води під льодом, °С;

θ - температура повітря на висоті 2 м, °С;

α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від води до нижньої поверхні льоду (Вт/м² °С), визначається за формулою:

$$\alpha_1 = 348(1 + 6\sqrt{v}); \quad (4.2)$$

де v - середня швидкість руху води під льодом, м/с;

α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від снігу до повітря (Вт/м² °С), визначається за формулою:

$$\alpha_2 = 23.2\sqrt{\omega + 0.3}; \quad (4.3)$$

де ω - швидкість вітру на висоті 2 м, м/с;

δ_i - товщини шарів снігу та льоду, м;

λ_1 - коефіцієнти теплопровідності шарів снігу та льоду, Вт/м² °С.

Коефіцієнти теплопровідності снігу залежать від його щільності і визначаються за формулами:

$$\lambda_{сн} = 2.85 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{сн}^2 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С} \quad \text{при } \rho_{сн} < 350 \text{ кг/м}^3, \quad (4.4)$$

де ρ - щільність снігу;

$$\lambda_{сн} = 3.56 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{сн}^2 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С} \quad \text{при } \rho_{сн} > 350 \text{ кг/м}^3. \quad (4.5)$$

Значення коефіцієнта теплопровідності льоду - $\lambda_l = 2.24$ Вт/м °С.

При розрахунку температур на межах розділу шарів треба мати на увазі, що при стаціонарному температурному режимі теплові потоки в окремих шарах рівні між собою та дорівнюють значенню q , тобто $q_1 = q_2 = q_3 = q$. Треба також мати на увазі, що температура води на границі розділу вода-лід дорівнює 0 °С.

Визначаючи питомий тепловий потік крізь шар льоду за законом Фур'є, можна розрахувати температури на межі між шарами товщі за формулою:

$$t_n = t_1 - q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n} \right). \quad (4.6)$$

За результатами розрахунку буде створено графік розподілу температури по товщині снігольодяного покриву.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1. Товщина шару снігу $\delta_1 = 0.07$ м, товщина шару затверділого снігу $\delta_2 = 0.05$ м, товщина льоду $\delta_3 = 0.20$ м.
2. Щільність відповідних шарів снігу $\rho_1 = 220$ кг/м³, $\rho_2 = 500$ кг/м³.
3. Метеорологічні дані: $\theta = -22$ °С; $\omega = 4.0$ м/с.
4. Температура води під льодом $t_g = 0.5$ °С.
5. Швидкість течії $v = 0.1$ м/с.

Порядок виконання роботи

1. Обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі від води до нижньої поверхні льоду за формулою (4.2):

$$\alpha_1 = 348(1 + 6\sqrt{0.1}) = 1008 \text{ Вт/м}^2 \text{ °С.}$$

2. Обчислюємо коефіцієнт тепловіддачі від снігу до повітря за формулою (4.3):

$$\alpha_2 = 23.2\sqrt{4 + 0.3} = 48.1 \text{ Вт/м}^2 \text{ °С.}$$

3. Коефіцієнти теплопровідності снігу визначаються за формулами (4.4) та (4.5):

$$\lambda_1 = 2.85 \cdot 10^{-6} \cdot (220)^2 = 0.14 \text{ Вт/м °С,}$$

$$\lambda_2 = 3.56 \cdot 10^{-6} \cdot (500)^2 = 0.89 \text{ Вт/м °С.}$$

4. За формулою (4.1) визначаємо питомий тепловий потік:

$$q = \frac{0.5 - (-22)}{\frac{1}{1008} + \frac{1}{48.1} + \frac{0.07}{0.14} + \frac{0.05}{0.89} + \frac{0.20}{2.24}} = 34.1 \text{ Вт/м}^2.$$

5. Тепловий потік надходить з водної маси до нижньої поверхні льоду, тому розрахунок температури на межі між шарами снігольодяної товщі виконується за формулами:

$$t_3 = t_4 - q \frac{\delta_3}{\lambda_3},$$

$$t_2 = t_4 - q \left(\frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right),$$

$$t_1 = t_4 - q \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right),$$

$$t_3 = 0.5 - 34.1 \cdot \frac{0.20}{2.24} = -2.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_2 = 0.5 - 34.1 \left(\frac{0.05}{0.89} + \frac{0.20}{2.24} \right) = -4.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_1 = 0.05 - 34.1 \left(\frac{0.07}{0.14} + \frac{0.05}{0.89} + \frac{0.20}{2.24} \right) = -21.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6. За результатами розрахунку температур будується графік розподілу їх по товщині снігольодяної товщі (рис. 4.1).

Література

1. Винников С.Д., Проскуряков В.В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 248 с.
2. Методичні вказівки до виконання контрольної роботи з курсу “Гідрофізика “ для студентів-гідрологів 4 курсу заочного факультету. – Одеса, ОГМІ, 1998. – 14 с.

5 Розрахунок розподілу температури води по глибині під льодом слабопроточного водосховища

Рівняння теплопровідності одномірного температурного поля при нестационарному режимі має вигляд [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial z^2}. \quad (5.1)$$

Простим методом рішення цього рівняння є метод кінцевих різниць. Рівняння (5.1) у кінцевих різницях записується так:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = a_T \frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2}, \quad (5.2)$$

де Δt - зміна температури на рівні z за інтервалом часу $\tau_{i+1} - \tau_i = \Delta \tau$;

a_T - коефіцієнт турбулентної теплопровідності;

$\frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2}$ - друга похідна температури по глибині z у момент часу τ_i .

При вирішенні конкретної задачі повинні бути задані:

1) початкові умови – розподіл температури по глибині у початковий момент часу: при $\tau = 0$; $t = f_1(z)$;

2) межові умови – значення температури на поверхні ($z=0$) у різні інтервали часу: при $z=0$; $t = f_2(z)$;

3) глибина водойми (одномірна задача);

4) значення коефіцієнта турбулентної теплопровідності - a .

Значення похідних температури у (5.2) зазначаються такими співвідношеннями:

$$\frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{t_{z,\tau_{i+1}} - t_{z,\tau_i}}{\Delta \tau}; \quad (5.3)$$

$$\frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2} = \frac{\left| \frac{\Delta t}{\Delta z} \right|_{II} - \left| \frac{\Delta t}{\Delta z} \right|_I}{\Delta z} = \frac{\left[\frac{t_{(z-\Delta z),\tau} - t_{z,\tau_i}}{\Delta z} \right] - \left[\frac{t_{z,\tau_i} - t_{(z-\Delta z),\tau_i}}{\Delta z} \right]}{\Delta z}, \quad (5.4)$$

де t_{z,τ_i} та $t_{z,\tau_{i+1}}$ - температура на рівні z у момент часу τ_i та τ_{i+1} ;

$t_{z-\Delta z}$ та $t_{z+\Delta z}$ - температура на рівні $z - \Delta z$ та $z + \Delta z$ у момент часу τ_i .

Якщо інтервали глибин Δz рівні, рівняння (5.4) приймає вигляд:

$$\frac{\Delta^2 t}{\Delta z^2} = \frac{t_{(z+\Delta z),\tau_i} - 2t_{z,\tau_i} + t_{(z-\Delta z),\tau_i}}{\Delta z}. \quad (5.5)$$

Підставивши (5.3) та (5.4) в (5.2), маємо:

$$\frac{t_{z,\tau_{i+1}} - t_{z,\tau_i}}{\Delta t} = \frac{2a_T \Delta \tau}{\Delta z^2} \left(\frac{t_{(z+\Delta z),\tau_i} + t_{(z-\Delta z),\tau_i}}{2} - t_{z,\tau_i} \right) - t_{z,\tau_i}; \quad (5.6)$$

$$t_{z,\tau_{i+1}} = \frac{2a_T \Delta \tau}{\Delta z^2} \left(\frac{t_{(z+\Delta z),\tau_i} + t_{(z-\Delta z),\tau_i}}{2} - t_{z,\tau_i} \right) - t_{z,\tau_i}. \quad (5.7)$$

Коефіцієнт $\frac{2a_T \Delta \tau}{\Delta z^2}$ можна підібрати, змінюючи $\Delta \tau$ і Δz так, щоб він дорівнював одиниці (умова Шмідта), тоді

$$t_{z,\tau_{i+1}} = \frac{t_{(z+\Delta z),\tau_i} + t_{(z-\Delta z),\tau_i}}{2}. \quad (5.8)$$

Завдання

Після інтенсивного вітрового перемішування води у водосховищі почалось його замерзання. О сьомій годині 1 грудня спостерігався розподіл температури, зображений на рис. 5.1 (крива 1). Треба розрахувати, через скільки годин (діб) установлюється стаціонарний режим, тобто лінійний розподіл температури (рис. 5.1, крива 2).

Побудувати графіки розподілу температури по глибині $t = f(z)$ за окремі моменти часу.

Вихідні дані:

1. Глибина водосховища H , ширина поперечного перерізу B , витрата води Q .

2. Початкова температура води t_n у момент замерзання τ_0 .

3. Теплообмін водної маси з дном $q_{дн}$.

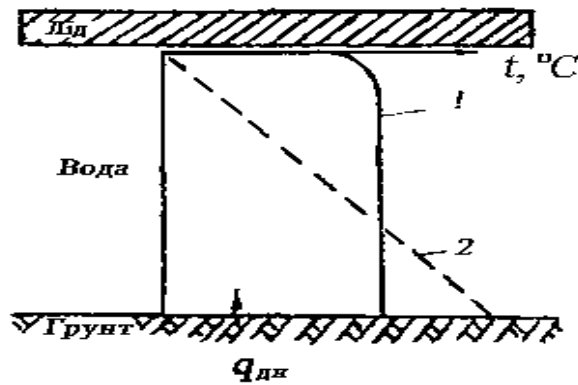


Рисунок 5.1 – Початковий (1) та розрахунковий(2) розподіл температури за глибиною водосховища

Пояснення до завдання

Коефіцієнт турбулентної теплопровідності λ визначається за формулою К.І. Росінського [1]:

$$\lambda_T = 1.16\sqrt{0.1q^2 + 0.521H^3} + 0.5, \quad (5.9)$$

де q - питома витрата води, м³/год;
 H - глибина водосховища, м;

$$q = \frac{Q}{B}, \quad (5.10)$$

де Q - витрата води, м³/с;
 B - ширина, м.

Коефіцієнт турбулентної температуропровідності розраховується по відношенню:

$$a_T = \frac{\lambda_T}{C \cdot \rho}, \quad (5.11)$$

де C та ρ - відповідно питома теплоємність та густина води.

Далі необхідно визначити, на яких глибинах і для якого часу буде виконуватись розрахунок температури води. Інтервал глибин $\Delta z=1$ м задається для глибини водосховища 4-5 м, $\Delta z=2$ м – для більших глибин.

Використовуючи умови Шмідта [1]

$$\frac{2a\Delta\tau}{\Delta z^2} = 1 \quad (5.12)$$

розраховуємо інтервали часу $\Delta\tau$.

Тепер необхідно записати межові умови. На поверхні розділу вода-лід температура води стала і дорівнює 0°C (межові умови першого роду):

$$t|_{z=0} = 0^\circ\text{C} \quad (5.13)$$

На нижній межі (на дні) задається густина теплового потоку від ґрунту до водної маси $q_{\partial H}$. Це межові умови другого роду

$$q_{\partial H} = \lambda_T \left. \frac{\Delta t}{\Delta z} \right|_{z=H}, \quad (5.14)$$

де $\frac{\Delta t}{\Delta z}$ - градієнт температури води у придонному шарі. Якщо

$$\Delta t = t|_{z=H} - t|_{z=H-\Delta z}, \quad (5.15)$$

то маємо температуру води на дні водойми

$$t|_{z=H} = t|_{z=H-\Delta z} + \frac{q_{\partial H}}{\lambda_T} \Delta z. \quad (5.16)$$

У цьому відношенні $t|_{z=H-\Delta z}$ - температура води на глибині $H - \Delta z$, яка розраховується за формулою (5.8).

Розрахунок температури води треба виконувати одночасно на заданих глибинах Δz , $2\Delta z$ і т.д. і у визначні моменти часу τ_0 , $\tau_0 + \Delta\tau$, $\tau_0 + 2\Delta\tau$ тощо, де τ_0 - початковий момент часу (сьома година 1 грудня). Розрахунки виконуються у табл. 5.1.

За результатами розрахунків будуються графіки розподілу температури води по глибині $t = f(z)$ для окремих моментів часу.

Таблиця 5.1 – Розрахунок температури води за методом кінцевих різниць

z	τ		
	τ ₀	τ ₀ + Δτ	τ ₀ + 2Δτ
0			
Δz			
2 Δz			
3 Δz			
...			
H			

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

$H=5$ м; $B=250$ м; $Q=30$ м³/с; $t_n=1.4$ °С; $q_{\partial H}=30$ Вт/м².

Порядок виконання

1. Коефіцієнт турбулентної теплопровідності:

$$\lambda_T = 1.16\sqrt{0.1 \cdot 432^2 + 0.521 \cdot 5^3} + 0.5 = 159 \text{ Вт/м}^2,$$

де $q = \frac{30}{250} = 0.12 \text{ м}^2/\text{с} = 432 \text{ м}^2/\text{ГОД}$.

2. Коефіцієнт турбулентної температуропровідності:

$$a = \frac{159}{4.2 \cdot 10^3 \cdot 10^3} = 37.9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с},$$

де $C=4.2 \cdot 10^3$ Дж/кг · °С ; $\rho=1000$ кг/м³.

3. $\Delta z=1$ м, $\Delta t = \frac{1}{2 \cdot 37.9 \cdot 10^{-6}} \approx 4$ год.

4. Температура води на поверхні розділу вода-лід дорівнює 0 °С, а на глибині 5 м дорівнює:

$$t|_{z=5} = t|_{z=4} + \frac{30}{159} \cdot 1 = 1.4^{\circ} + 0.2^{\circ}.$$

5. За результатами розрахунків (табл. 5.2) будуються графіки розподілу температури води по глибині $t = f(z)$ для окремих моментів часу (рис. 5.2)

Таблиця 5.2 - Розрахунок температури води

z	τ					
	τ_0	1.XII-11 г.	1.XII-15 г.	1.XII-19 г.	1.XII-23 г.	2.XII-3 г.
0	0	0	0	0	0	0
Δz	1.4	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5
$2\Delta z$	1.4	1.4	1.1	1.1	1.0	1.0
$3\Delta z$	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.4
$4\Delta z$	1.4	1.5	1.6	1.7	1.7	1.7
H	1.6	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9

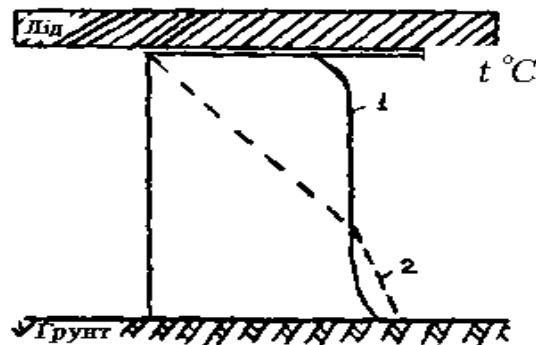


Рисунок 5.2 - Початковий (1) та розрахунковий (2) розподіл температури за глибиною водосховища

Під льодом стаціонарний режим буде спостерігатися 2 грудня о 3 годині.

Література

1. Винников С.Д., Проскуряков В.В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 248 с.
2. Гопченко Є.Д., Крес Л.Є. Теплообмін у водних об'єктах. – Одеса, 1997. – 103 с.

6 Розрахунок довжини ополонки

В період льодоставу на річках можуть зберігатися відкриті простори води серед льодяного покриву, так звані ополонки. Вони утворюються під дією динамічних та термічних факторів.

Ополонки динамічного походження виникають на порогах, стремнинах та в нижніх б'єфах ГЕС. Вони можуть зберігатися протягом усієї зими і є осередками шуги, яка заноситься під лід та спричиняє утворення зажорів.

Ополонки термічного утворення виникають у місцях виходу теплих ґрунтових та промислових вод, у нижніх б'єфах гребель ГЕС та верхів'ях річок, що витікають з озер та водосховищ внаслідок притоку тепліших вод.

Завдання

При роботі ГЕС вода з водосховища скидається у нижній б'єф. У зимових умовах утворюється ополонка. Треба розрахувати довжину цієї ополонки (рис. 6.1).

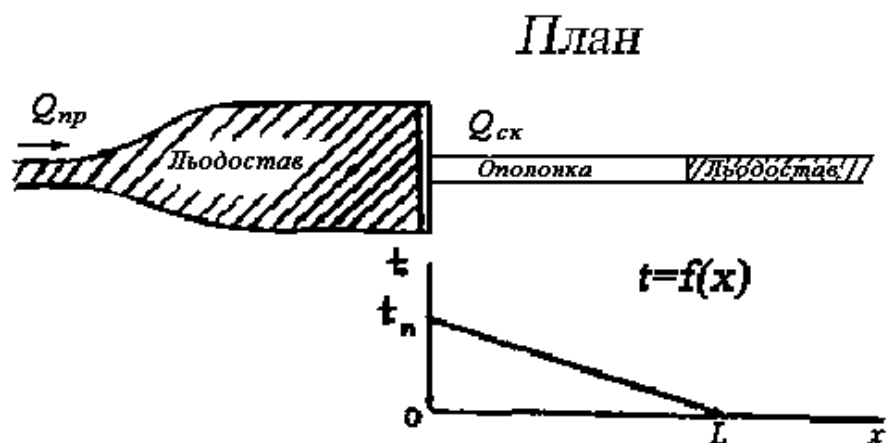


Рисунок 6.1 – Схема розрахунку довжини ополонки

Вихідні дані:

1. Місцезположення водосховища (φ° півн.ш.) та розрахунковий період – перша декада січня.
2. Витрата та температура води, яка скидається, відповідно $Q_{ск}$ та t_g .
3. Ширина річки у нижньому б'єфі $b = 0.1B$; B - ширина річки.
4. Метеорологічні дані: температура та парціальний тиск водяної пари повітря, відповідно t_{200} та e_{200} , швидкість вітру ω_{200} , загальна хмарність N_3 , нижньої хмарності немає.

Пояснення до завдання

Довжина ополонки розраховується за рівнянням теплового балансу [1]:

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{\sum_1^n S}{C \cdot \rho \cdot q_v}, \quad (6.1)$$

де q_v - питома витрата води, м³/ГОД

$$q_v = \frac{Q}{b}; \quad (6.2)$$

C - питома теплоємність, $4.2 \cdot 10^3$ Дж/кг·с;

ρ - густина води, 1000 кг/м³;

$\sum_1^n S$ - теплообмін водної поверхні з атмосферою, Вт/м², що складається з радіаційного балансу, тепловіддачі на випаровування та конвективного теплообміну.

Розрахунок теплових потоків $\sum_1^n S$ (теповіддача) виконується за формулами [2]:

1. Радіаційний баланс обчислюється за формулою П.П. Кузьміна:

$$R = (S_{np} + S_{pp})_o (1 - A) C' - S_{ef}, \quad (6.3)$$

де $(S_{np} + S_{pp})_o$ - пряма та розсіяна сонячна радіація при безхмарному небі, визначається за табл. 6.1;

A - коефіцієнт відбиття або альbedo підстильної поверхні, визначається за табл. 6.2.

C' - поправка на хмарність, визначається за формулою:

$$C' = (1 - 0.14N_z - 0.53N_H), \quad (6.4)$$

де N_z , N_H - відповідно загальна та нижня хмарність в долях від одиниці;

Таблиця 6.1 – Сумарна сонячна радіація $(S_{np} + S_{pp})_o$ при альбедо $A=0$
в залежності від широти місцевості

Широта, ° п.ш.	Місяць											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
40	114	160	220	280	317	330	320	287	236	178	126	101
42	104	151	213	276	316	331	320	285	230	169	116	92
44	94	142	205	271	315	333	320	283	224	160	107	81
46	85	131	197	266	314	333	320	279	217	151	98	72
48	74	122	188	260	312	334	320	276	211	143	87	63
50	65	112	179	255	311	334	319	272	204	134	78	55
52	55	102	170	249	307	333	317	267	197	124	66	45
54	45	92	162	243	305	333	316	263	188	115	59	37
56	36	84	152	237	301	333	314	258	180	106	51	29
58	27	73	143	230	299	333	313	254	172	97	43	22
60	19	64	134	222	297	333	313	249	164	87	35	15

S_{ef} - ефективне випромінювання визначається за формулою:

$$S_{ef} = \varepsilon \sigma T_n^4 - (0.62 + 0.05 \sqrt{e_{200}})(1 + 0.12 N_z + 0.12 N_n) \varepsilon \sigma T_{200}^4, \quad (6.5)$$

де ε - відносна випромінююча здатність довгохвильової радіації (для води $\varepsilon=1.0$, для снігу $\varepsilon=0.99$, для льоду $\varepsilon=0.95$);

σ - стала Стефана-Больцмана;

T_n та T_{200} - абсолютна температура підстильної поверхні та температура повітря на висоті 200 см над підстильною поверхнею;

σT^4 - визначається за таблицею 1.4;

e_{200} - абсолютна вологість повітря на висоті 200 см;

2. Втрата теплоти на випаровування обчислюється за формулою В.А. Римши та Р.В. Донченко:

$$S_e = 2.95(e_o - e_{200})(K + \omega_{200}), \quad (6.6)$$

де e_o - максимальна пружність водяної пари при температурі поверхні, визначається за табл. 6.3;

e_{200} та ω_{200} - відповідно абсолютна вологість та швидкість вітру на висоті 200 см;

K - коефіцієнт, що залежить від різниці температур води та повітря Δt (табл. 6.4).

Таблиця 6.2 – Значення середнього за добу альбедо водної поверхні A

Місяць	Хмарність		Градуси південної широти		
	N_z	N_H	40	50	60
1	2	3	4	5	6
I	0	0	0.13	0.20	0.27
	5	0	0.12	0.17	0.24
	5	5	0.13	0.18	0.25
	10	0	0.08	0.09	0.09
	10	5	0.08	0.09	0.09
	10	10	0.08	0.08	0.08
II	0	0	0.09	0.12	0.19
	5	0	0.08	0.11	0.17
	5	5	0.09	0.11	0.19
	10	0	0.08	0.09	0.09
	10	5	0.08	0.08	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
III	0	0	0.06	0.08	0.11
	5	0	0.06	0.08	0.11
	5	5	0.07	0.08	0.12
	10	0	0.07	0.08	0.09
	10	5	0.08	0.08	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
IV	0	0	0.05	0.06	0.08
	5	0	0.06	0.06	0.08
	5	5	0.06	0.07	0.09
	10	0	0.06	0.07	0.08
	10	5	0.07	0.07	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
V	0	0	0.05	0.05	0.07
	5	0	0.05	0.06	0.07
	5	5	0.05	0.06	0.07
	10	0	0.06	0.06	0.07
	10	5	0.06	0.07	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
VI	0	0	0.05	0.05	0.07
	5	0	0.05	0.06	0.07
	5	5	0.05	0.06	0.07
	10	0	0.06	0.06	0.07
	10	5	0.06	0.07	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08

Продовження таблиці 6.2

Місяць	Хмарність		Градуси південної широти		
	N_3	N_H	40	50	60
1	2	3	4	5	6
VII	0	0	0.05	0.05	0.07
	5	0	0.05	0.06	0.07
	5	5	0.05	0.06	0.07
	10	0	0.06	0.06	0.07
	10	5	0.06	0.07	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
VIII	0	0	0.05	0.06	0.07
	5	0	0.05	0.06	0.07
	5	5	0.05	0.06	0.07
	10	0	0.06	0.06	0.07
	10	5	0.06	0.07	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
IX	0	0	0.06	0.07	0.10
	5	0	0.06	0.07	0.09
	5	5	0.06	0.07	0.09
	10	0	0.07	0.08	0.08
	10	5	0.07	0.08	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
X	0	0	0.08	0.10	0.14
	5	0	0.08	0.09	0.12
	5	5	0.08	0.09	0.13
	10	0	0.08	0.08	0.08
	10	5	0.08	0.08	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08
XI	0	0	0.11	0.17	0.26
	5	0	0.10	0.15	0.22
	5	5	0.11	0.16	0.24
	10	0	0.09	0.09	0.09
	10	5	0.08	0.09	0.09
	10	10	0.08	0.08	0.08
XII	0	0	0.13	0.20	0.26
	5	0	0.12	0.16	0.22
	5	5	0.12	0.18	0.26
	10	0	0.08	0.08	0.09
	10	5	0.08	0.08	0.08
	10	10	0.08	0.08	0.08

Таблиця 6.3 – Максимальна пружність водяної пари e_o

Температура води, °С	e_o , мбар	Температура води, °С	e_o , мбар
0	6.1	17	19
2	7.1	20	23
5	8.7	22	26
7	10.0	25	32
10	12	27	36
12	14	30	42

Таблиця 6.4 – Значення коефіцієнта K

Δt	K	Δt	K	Δt	K	Δt	K
0	1.28	4	2.10	12	3.33	30	4.35
1	1.54	5	2.56	15	3.56	40	4.60
2	1.80	8	2.80	20	3.84		
3	2.10	10	3.08	25	4.10		

3. Конвективний теплообмін обчислюється за формулою В.А. Римши та Р.В. Донченко:

$$S_k = 1.89(t_{нов} - t_{200})(K + \omega_{200}), \quad (6.7)$$

де $t_{нов}$ та t_{200} - відповідно температура поверхні води та повітря на висоті 200 см.

У зимових умовах усі складники мають від'ємний знак – відбувається тепловіддача від водної поверхні в атмосферу. Тому температура води по довжині ополонки буде знижуватись і на відстані L від греблі буде дорівнювати 0 °С. таким чином, довжина ополонки L дорівнює довжині Δx , де відбувається зниження температури на $\Delta t = 0 - t_n$, де t_n - початкова температура води.

До розрахункових формул входить температура поверхні води $t_{нов}$ та тиск насиченої водяної пари e_o , що залежить від $t_{нов}$. Це значно ускладнює розрахунок, але в зв'язку з тим, що діапазон змінення температури води Δt малий, за температуру поверхні води $t_{нов}$ можна прийняти сталі значення, яке дорівнює середньому значенню температури на ділянці Δx :

$$t_{сер} = \frac{t_n + 0}{2} = 0.5t_n. \quad (6.8)$$

Довжина ополонки обчислюється за формулою:

$$\Delta x = \frac{\Delta t \cdot C \cdot \rho \cdot q_v}{\sum_1^n S}. \quad (6.9)$$

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1. Місцезаположення водосховища $\varphi = 50^\circ$ п.ш., розрахунковий період – перша декада січня.
2. Витрата води $Q_{ск} = 30 \text{ м}^3/\text{с}$, початкова температура води $t_n = 1.4^\circ$.
3. Ширина річки – 250 м.
4. Ширина річки у нижньому б'єфі $b = 0.1 B = 0.1 \cdot 250 = 25$ м.
5. Метеорологічні дані: $t_{200} = -22^\circ \text{C}$, $e_{200} = 0.8$ мб, $w_{200} = 4.0$ м/с, $N_3 = 1.0$, нижньої хмарності немає.

Порядок виконання роботи

1. За формулою (6.2) обчислюємо температуру поверхні води:

$$q_v = \frac{30}{25} = 1.2 \text{ м/с}^2.$$

2. за формулою (6.8) обчислюємо температуру поверхні води:

$$t_{нов} = \frac{1.4 + 0}{2} = 0.7^\circ \text{C}.$$

3. Зниження температури:

$$\Delta t = 0^\circ - 1.4^\circ = -1.4^\circ.$$

4. Розрахунок теплових потоків:

а) за формулою (6.3)

$$R = 65(1 - 0.09) \cdot (1 - 0.14 \cdot 1.0) - 323 + (0.62 + 0.05\sqrt{0.8}) \times \\ \times (1 + 0.12 \cdot 1) \cdot 226 = -105 \text{ Вт/м}^2;$$

б) за формулою (6.6):

$$S_g = 2.95(6.55 - 0.8)(3.9 + 4.0) = -134 \text{ Вт/м}^2;$$

в) за формулою (6.7)

$$S_k = 1.89 \cdot [0.7 - (-22)] \cdot (0.39 + 4.0) = -339 \text{ Вт/м}^2;$$

г) $\sum S = R + S_g + S_k = -578 \text{ Вт/м}^2.$

5. Довжина ополонки за формулою (6.9) дорівнює:

$$\Delta x = \frac{(-1.4) \cdot 4.2 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 1.2}{-578} = 12.2 \text{ км.}$$

Література

1. Винников С.Д., Проскураков Б.В. Гидрофизика. – Л: Гидрометеиздат, 1988. – 248 с.
2. Гопченко Є.Д., Крес Л.Є. Теплообмін у водних об'єктах. Одеса, 1997 – 103 с.
3. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. – Л: Гидрометеозиздат, 1983. 176 с.

7 Розрахунок наростання товщини льоду

Після встановлення льодоставу нарощення льоду на водоймища залежить від потоків теплоти, яка витрачається, виходячи крізь лід в атмосферу та приходить знизу з водної товщі. Якщо потік теплоти з води до підльодяної поверхні буде меншим за потік теплоти крізь лід в атмосферу, спостерігається нарощення льоду. Найінтенсивніше лід нарощується в перші дві-три декади після встановлення льодоставу. У цей час лід та сніг на ньому мають незначну товщу і можуть пропускати тепловий потік, який значно перевищує потік теплоти з водної товщі до нижньої поверхні льоду. У наступні часи наростання льоду поступово зменшується. Чим вище тепловіддача дна водоймища, тим лід тонший. У місцях виходу теплої води тепловіддача зростає, що може перевищити теплопотік крізь лід в атмосферу, і тому виникають ополонки.

Протягом зими лід деформується, pojawiaються тріщини. Термічні тріщини виникають при різких добових змінах температури поверхневих шарів льоду, якщо на ньому відсутній сніг, а також під дією вітру – динамічні тріщини. Лід на водоймищах має шарову будову. На поверхні води лежить водний кристалічний найпрозоріший лід, на якому при виході води тріщинами з проталою водою утворюється мутно-білий малої прозорості водно-сніговий лід. При таненні та подальшому замерзанні на льоду снігу виникає сніговий лід.

Товщина льоду у водоймищах залежить від гідрометеорологічних умов зими, розмірів водоймищ, характеру берегової лінії.

Завдання

Утворення льоду на водоймі почалося 1 грудня. Розрахувати товщину льоду наприкінці грудня, якщо біля берега лід укритий снігом.

Вихідні дані:

1. Меторологічні дані: середньо декадні значення температури повітря θ_{200} та швидкість вітру ω_{200} за першу декаду грудня; протягом двох наступних декад температура повітря знижувалась за градієнтом $0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ за добу, а швидкість вітру не змінювалась.

2. Дані щодо висоти та щільності снігу на льоду біля берега: у першу декаду снігу не було; у другу декаду $h_{сн}=0.08\text{ м}$; у третю $h_{сн}=0.12\text{ м}$; щільність снігу дорівнює ρ_1 .

Пояснення до завдання

Для розрахунку товщини льоду використовуються такі формули [1]:

$$h_l = -A + \sqrt{(A + h_{l_0})^2 - \frac{2\theta_{200}\lambda}{L_{кр} \cdot \rho_l}(\tau - \tau_0)}. \quad (7.1)$$

Якщо снігу немає

$$h_l = -\frac{\lambda_l}{\alpha_l} + \sqrt{\left(\frac{\lambda_l}{\alpha_l}\right)^2 + h_{l_0}^2 + 2h_{l_0} \frac{\lambda_l}{\alpha_l} - \frac{2\theta_{200}\lambda_l}{L_{кр} \cdot \rho_l}(\tau - \tau_0)}, \quad (7.2)$$

де

$$A = \frac{\lambda_l}{\alpha_{сн}} + h_{сн} \frac{\lambda_l}{\lambda_{сн}}; \quad (7.3)$$

де λ_l - коефіцієнт теплопровідності льоду, дорівнює 2.24 Вт/м °С;

α_l - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні льоду до повітря (при відсутності снігу на льоду), Вт/м²°С:

$$\alpha_l = 5.8\sqrt{\omega_{200} + 0.3}, \quad (7.4)$$

де ω_{200} - швидкість вітру;

$\alpha_{сн}$ - коефіцієнт тепловіддачі від поверхні снігу до повітря, Вт/м²°С:

$$\alpha_{сн} = 23.2\sqrt{\omega_{200} + 0.3}; \quad (7.5)$$

h_{l_0} - початкова товщина льоду (на початок розрахункового періоду τ_0), м;

$L_{кр}$ - питома теплота кристалізації, $L_{кр} = 33.3 \cdot 10^4$ Дж/кг;

$\lambda_{сн}$ - коефіцієнт теплопровідності снігу, визначається за формулами:

- при $\rho \leq 350$ кг/м³

$$\lambda_{сн} = 2.85 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{сн}^2 \text{ Вт/м } ^\circ\text{С}; \quad (7.6)$$

- при $\rho > 350$ кг/м³

$$\lambda_{сн} = 3.56 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_{сн}^2 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}; \quad (7.7)$$

$\rho_{сн}$ - щільність снігу, кг/м³;

θ_{200} - середньодекадні значення температури повітря;

$h_{сн}$ - висота снігу, м;

$\rho_{л}$ - щільність льоду, кг/м³.

Розрахунок виконується по декадних інтервалах часу, що дозволяє розрахувати товщини льоду на кінець кожної декади. Для першої декади $h_{л_0}$ дорівнює нулю. Для наступних декад за початкову товщину льоду приймається значення товщини льоду, розраховане на кінець попередньої декади.

Приклад розрахунку

Вихідні дані:

1. Метеорологічні дані: $\theta_{200} = -9$ °C; $\omega_{200} = 5.0$ м/с.

2. I декада - $h_{сн} = 0$; II декада - $h_{сн} = 0.08$ м; III декада - $h_{сн} = 0.12$ м;
 $\rho_{сн} = 240$ кг/м³; $\lambda_{л} = 2.24$ Вт/м °C; $L_{кр} = 33.3 \cdot 10^4$ Дж/кг; $L_{кр} = 33.3 \cdot 10^4$ Дж/кг;
 $\rho_{л} = 917$ кг/м³.

3. Для першої декади $h_{л_0} = 0$.

Порядок виконання роботи

1. За формулою (7.4) коефіцієнт тепловіддачі від поверхні льоду до повітря (при відсутності снігу на льоду):

$$\alpha_{л} = 5.8 \sqrt{5.0 + 0.3} = 13.4 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. За формулою (7.5) коефіцієнт тепловіддачі від поверхні снігу до повітря:

$$\alpha_{сн} = 23.2 \sqrt{5.0 + 0.3} = 53.4 \text{ Вт/м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

3. За формулою (7.2) товщина льоду на кінець I декади:

$$h_{л I} = -\frac{2.24}{13.4} + \sqrt{\left(\frac{2.24}{13.4}\right)^2 + 0 + 0 - \frac{2 \cdot (-9) \cdot 2.24}{33.3 \cdot 10^4 \cdot 917} \cdot 10 \cdot 86400} = 0.20 \text{ м.}$$

4. За формулою (7.6):

$$\lambda_{сн} = 2.85 \cdot 10^{-6} \cdot (240)^2 = 0.16 \text{ Вт/м } ^\circ\text{C}$$

5. За формулою (7.3) параметр A для II декади:

$$A = \frac{2.24}{53.4} + 0.08 \frac{2.24}{0.16} = 1.13.$$

6. За формулою (7.1) товщина льоду на кінець II декади при $\theta_{200} = -9^\circ - 8^\circ = -17^\circ$:

$$h_{л II} = -1.13 + \sqrt{(1.13 + 0.20)^2 - \frac{2 \cdot (-17) \cdot 2.24}{33.3 \cdot 10^4 \cdot 917} \cdot 10 \cdot 86400} = 0.28 \text{ м.}$$

7. За формулою (7.3) параметр A для III декади:

$$A = \frac{2.24}{53.4} + 0.12 \frac{2.24}{0.16} = 1.68.$$

8. За формулою (7.1) товщина льоду на кінець III декади при $\theta_{200} = -17^\circ - 8.8^\circ = -25.8^\circ\text{C}$:

$$h_{л III} = -1.68 + \sqrt{(1.68 + 0.20)^2 - \frac{2 \cdot (-25.8) \cdot 2.24}{33.3 \cdot 10^4 \cdot 917} \cdot 10 \cdot 86400} = 0.37 \text{ м.}$$

Література

1. Винников С.Д., Проскуряков Б.В. Гидрофизика. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. - 248 с.
2. Мишон В.М. Практическая гидрофизика. – Л.: Гидрометеоздат, 1983. – 176 с.

Перелік питань для самоконтролю

1. В чому полягає фізична основа теплового балансу?
2. В чому полягає суть метода розрахунку температури поверхні води за методом теплового балансу?
3. Назвіть основні складники рівняння теплового балансу.
4. Що таке “радіаційний баланс”?
5. Що таке “ефективне випромінювання”?
6. Як визначаються складники рівняння теплового балансу?
7. В чому полягають умови початку льодоутворення на річках?
8. Назвіть основні складники питомої тепловіддачі водної поверхні.
9. При яких умовах розраховується тепловий потік крізь снігольодяний покрив?
10. Як розраховуються коефіцієнти теплопровідності снігу?
11. Від яких факторів залежать коефіцієнти тепловіддачі?
12. Як визначається температура на межі між шарами снігольодяної товщі?
13. В чому полягає суть метода суперпозиції?
14. Як розраховуються критерії Фур’є та Біо?
15. Яке диференційне рівняння покладено в основу розрахунку розподілу температури води по глибині під льодом водосховища?
16. В чому полягає метод кінцевих різниць?
17. Як розраховуються коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності?
18. Які параметри визначаються за допомогою умов Шмідта?
19. Як визначається градієнт температури у придонному шарі?
20. Як утворюються ополонки динамічного та термічного утворення?
21. Яке рівняння покладено для розрахунку довжини ополонки?
22. Як розраховуються теплові потоки – тепловіддача?
23. Назвіть умови, при яких спостерігається нарощення льоду на його нижній поверхні.
24. Поясніть вплив снігового покриву на процес нарощення льоду.
25. Від яких факторів залежить товщина льоду на водоймах?
26. Як визначаються коефіцієнти тепловіддачі?
27. Що таке “еквівалентна” товщина льоду?
28. Поясніть отримані результати розрахунку товщини льоду.

Вихідні дані

Таблиця 1 - Вихідні дані до завдання 1

Варіант Місяць	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура повітря, θ_{200} , °С										
V	8.0	13.1	11.2	12.1	11.6	13.0	15.7	7.4	10.2	12.3
VI	14.1	17.5	16.3	15.3	17.2	17.0	20.6	14.3	15.8	15.6
VII	16.5	20.1	18.6	18.4	20.0	19.2	23.8	16.8	17.0	17.0
VIII	13.6	17.5	16.4	16.2	18.0	16.8	21.4	13.9	15.0	16.4
IX	7.6	11.3	10.2	11.4	13.2	10.2	14.3	8.1	8.6	12.3
X	1.1	3.8	4.0	9.0	10.0	3.5	5.8	1.0	7.8	10.2
Абсолютна вологість, e_{200} , мб										
V	7.7	8.7	9.0	10.0	10.0	10.0	10.0	7.4	9.0	10.0
VI	11.6	12.5	13.5	14.5	13.5	13.0	13.0	10.9	14.5	12.3
VII	14.0	14.4	16.2	16.2	17.8	14.8	14.2	14.2	14.2	14.2
VIII	12.5	13.2	13.1	13.3	14.1	13.5	12.6	12.9	13.2	14.1
IX	9.1	9.8	10.4	10.2	11.2	9.2	9.7	9.3	10.2	10.2
X	5.7	6.5	6.9	7.0	7.0	6.2	7.0	6.0	5.8	5.8
Температура t води за місяць, °С										
V	10.7	12.5	12.0	12.0	14.0	11.5	14.5	10.5	9.6	11.0
Загальна хмарність в частках від 1										
V	0.4	0.6	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6	0.6	0.6	0.5
VI	0.4	1.0	0.5	0.5	0.5	0.7	0.4	0.4	0.6	0.4
VII	0.0	0.7	0.2	0.2	0.2	0.7	0.1	0.3	0.4	0.3
VIII	0.3	0.4	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2
IX	0.6	0.5	0.3	0.2	0.5	0.5	0.2	0.3	0.3	0.3
X	0.6	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	0.6
Нижня хмарність в частках від 1										
V	0.4	0.3	0.7	0.7	0.6	0.7	0.5	0.6	0.5	0.4
VI	0.2	0.9	0.2	0.3	0.4	0.5	0.4	0.2	0.5	0.3
VII	0.0	0.7	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.3	0.2
VIII	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1
IX	0.3	0.3	0.2	0.0	0.2	0.3	0.1	0.2	0.2	0.1
X	0.6	0.0	1.0	0.9	1.0	0.9	0.7	1.0	0.9	0.5
Широта центру водосховища, φ півд. ш.										
	55	45	50	50	50	55	45	50	50	55
Глибина водосховища, H , м										
	12	16	20	14	11.5	12	21	18	22	17
Довжина розгону L , км										
	15	18	30	20	24	19	14	19	20	25

Таблиця 2 - Вихідні дані до завдання 2

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глибина водосховища H , м	40	45	50	40	50	45	50	40	45	50
Теплообмін у I декаду S_1 , Вт/м ²	180	170	190	150	160	170	180	200	170	160
Зміна теплового потоку у II декаду S' , Вт/м ² ·°C	0.00015	0.00017	0.00012	0.00010	0.00011	0.00016	0.00017	0.00011	0.00012	0.00013
Зміна теплового потоку у III декаду S'' , Вт/м ² ·°C	0.00004	0.00002	0.00004	0.00003	0.00005	0.00003	0.00006	0.00002	0.00005	0.00006

Таблиця 3 - Вихідні дані до завдання 3

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Дата 20/X										
Температура повітря θ , °C	- 3.8	- 3.3	- 3.2	- 3.0	- 2.7	- 4.8	- 4.0	- 2.8	- 2.6	- 3.5
Швидкість вітру ω , м/с	4.9	5.1	5.0	4.7	4.9	4.0	5.0	4.5	5.0	4.6
Загальна хмарність N_z , бал	6.0	4.0	5.0	3.0	4.0	4.0	5.0	4.0	4.0	5.0
Середня температура води $t_{сер}$, °C	0.5	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4	0.5	0.6	0.4	0.5
Швидкість руху води, v , м/с	0.49	0.39	0.44	0.43	0.46	0.48	0.48	0.46	0.43	0.44
Дата 21/X										
Температура повітря θ , °C	- 7.9	- 6.5	- 6.2	- 7.0	- 8.9	- 9.2	- 8.2	- 6.9	- 7.2	- 8.6
Швидкість вітру ω , м/с	5.7	4.4	4.3	4.6	4.0	5.2	5.2	4.2	5.1	5.2
Загальна хмарність N_z , бал	6.0	4.0	4.0	4.0	4.0	5.0	5.0	5.0	6.0	5.0
Середня температура води $t_{сер}$, °C	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3
Швидкість руху води, v , м/с	0.41	0.31	0.43	0.42	0.44	0.48	0.48	0.50	0.43	0.42

Вихідні дані до завдань 4-7

Водосховище розташовано на широті $\varphi=50^\circ$ півн. ш.

Розрахунковий період: грудень-січень

Таблиця 4- Характеристики водосховища

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Глибина, H м	4	4	5	5	5	8	8	10	10	10
Ширина, B м	200	200	250	250	250	400	400	500	500	500
Витрата, Q м ³ /с	10	15	20	25	30	50	55	65	70	75

Таблиця 5 – Метеорологічні дані (середньодекадні значення температури повітря θ_{200} , парціальний тиск водяної пари e_{200} , швидкість вітру ω_{200} , загальна хмарність N_z)

Варіант	Період часу	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
θ_{200} , °С	Перша декада січня	- 14	- 16	- 18	- 20	- 22	- 24	- 26	- 28	- 30	- 32
e_{200} , гПа		2.2	1.7	1.3	1.0	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
ω_{200} , м/с		5.6	5.2	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.8	2.4	2.0
N_z , у долях від одиниці		1.0	1.0	0.5	0.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0	0
θ_{200} , °С	Перша декада грудня	- 5	- 6	- 7	- 8	- 9	- 10	- 11	- 12	- 13	- 14
ω_{200} , м/с		6.6	6.2	5.8	5.4	5.0	4.6	4.2	3.8	3.4	3.0

Таблиця 6 – Характеристики шару снігу, який щойно випав,
товщина δ_1 , щільність ρ_1

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
δ_1 , м	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09
ρ_1 , кг/м ³	140	160	180	200	220	240	160	280	300	320

Таблиця 7 – Початкова температура води

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
t_n , °C	1.2	1.2	1.4	1.4	1.4	1.8	1.8	2.0	2.0	2.0

Таблиця 8 – Теплообмін водної маси з дном

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$q_{\text{дн}}$, Вт/м ²	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38

ЗБІРНИК МЕТОДИЧНИХ ВКАЗІВОК
ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ “ГІДРОФІЗИКА”

Укладач: доц. Крес Л.Є.

Підписано до друку 25.10.2007 Формат 60×84/16 Папір офсетний.
Друк офсетний. Ум. друк. арк. 4,88 Тираж 50 прим. Зам. №150

Надруковано з готового оригінал-макета

Одеський державний екологічний університет
65016, м. Одеса, вул. Львівська, 15

Друкарня видавництва «Екологія»
65016, м. Одеса, вул. Базарна, 106.
Тел.: (0482) 33-07-17, 37-07-95, 37-14-25