

11. Пехович А.И., Жидких В.М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.

12. Платунов Е.С., Буравой С.Е., Курепин В.В., Петров Г.С. Теплофизические измерения и приборы. – Л.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

13. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В., Воробьев Л.И. Рекомендации по проектиро-

ванию теплотеметрических приборов для определения теплопроводности твердых материалов // Наукові праці IV Міжн. наук.-техн. конф. “Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія - 2004)” 12-14 жовтня 2004 р. – Харків, 2004. – Т.2, С. 42–45.

Получено 16.05.2008 г.

УДК 536.2:536.3:536.6:629.7:697.34

**БАСОК Б.І., ВОРОБІЙОВ Л.Й.,
МИХАЙЛИК В.А., ЛУНІНА А.О.**

Інститут технічної теплофізики НАН України

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИРОДНОГО ҐРУНТУ

Наведено результати досліджень теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності) ґрунту в залежності від температури та вологовмісту.

Представлены результаты исследования теплофизических свойств (коэффициента теплопроводности и удельной теплоёмкости) грунта в зависимости от температуры и влагосодержания.

We present some results of investigation of the thermophysical properties (thermal-conductivity coefficient and specific heat) of ground depending on its temperature and moisture content.

C – питома теплоємність;

E – сигнали;

H – товщина;

$K(T)$ – коефіцієнт перетворення;

m – маса;

T – температура;

Y – амплітуда відхилення ДСК-кривої від базової лінії;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

ΔT – різниця значень температури.

Скорочення:

ДСК – диференційний скануючий калориметр;

ПТ – перетворювач температури;

ИТ – вимірювач тепловий;

ПТП – перетворювач теплового потоку.

Індекси нижні:

зр – зразок;

конт – контейнер;

скл – оргскло;

r – еталон (корунд);

s – дослідний матеріал (зразок ґрунту);

1, 2 – номер ПТП.

Вступ

Одним з відновлювальних джерел низькопотенційної теплової енергії є природна теплота ґрунту, який має здатність протягом тривалого часу акумулювати та зберігати сонячну енергію. Її вилучення та подальше використання для теплопостачання приміщень базується на застосуванні теплонасосних технологій і реалізується за допомогою горизонтально і неглибоко прокладених у

землі теплообмінників (ґрунтових колекторів) або вертикально розміщених теплообмінників (ґрунтових зондів).

Колектори виготовляються з корозієстійких полімерних труб і розміщуються на глибині близько 1,5...2,5 м незабудованого ґрунтового масиву достатньо великих площ. Розмір необхідної поверхні, як і акумулюючі властивості ґрунту, залежать від його вологовмісту, теплофізичних властивостей та складу. В свою чергу, термічні влас-

тивості, а саме об'ємна теплоємність та теплопровідність, дуже сильно залежать від складу і стану ґрунту. В цьому відношенні визначальними величинами будуть перш за все частка води, склад мінеральних домішок, а також частка та розмір пор, що заповнені повітрям. Загалом можна стверджувати, що акумулюючі властивості ґрунту тим вищі, чим більше ґрунт насичений водою, чим вища частка мінеральних складових і чим менші розміри та кількість порожнин у ґрунті. Визначення необхідної площі поверхні ґрунту (ґрунтового масиву) залежить від теплоспоживання будівлі та властивостей ґрунту [1].

Метою роботи є визначення теплофізичних властивостей (коефіцієнта теплопровідності та питомої теплоємності) ґрунту в залежності від температури та вологовмісту.

Об'єктами досліджень виступили два зразки ґрунту з глибин 1,65 м (зразок № 1) та 3,65 м (зразок № 2), що були відібрані при спорудженні на території ІТТФ НАН України багатопетлевого ґрунтового колектора. Орієнтовний тип ґрунтів (виходячи з зовнішнього вигляду та консистенції) – глина з домішками піску.

Дослідження зразків з метою визначення теплофізичних властивостей виконано на установках ІТТФ НАН України. Для визначення коефіцієнтів теплопровідності використовувався метод пластини на установці ІТ-7, що оснащена перетворювачами теплового потоку [2, 3]. Дослідження питомої теплоємності здійснювалось за допомогою калориметричного комплексу на базі диференційного скануючого мікрокалориметра ДСМ-2М з комп'ютерною системою збору та обробки інформації [4].

Визначення коефіцієнтів теплопровідності зразків ґрунту

Вимірювання коефіцієнтів теплопровідності зразків ґрунту здійснено методом пластини на установці ІТ-7. Цю установку призначено для вимірювання коефіцієнтів ефективної теплопровідності і термічного опору різноманітних будівельних і теплоізоляційних матеріалів відповідно до стандартів [5, 6].

Основні технічні характеристики установки ІТ-7 такі:

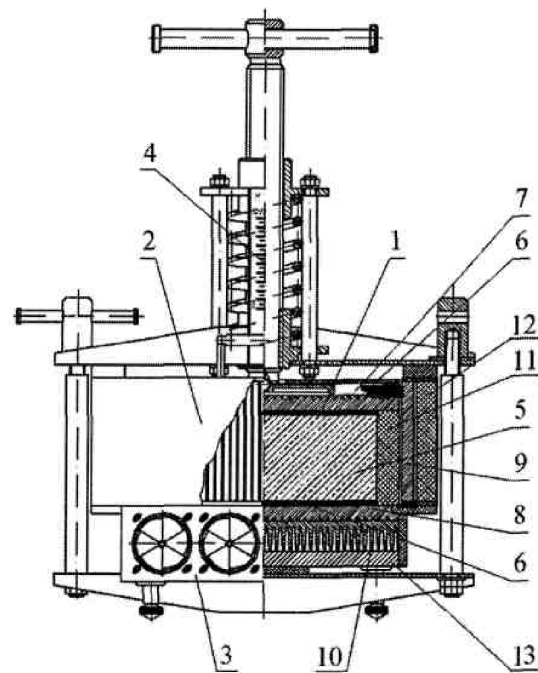


Рис. 1. Конструктивна схема теплового блоку установки ІТ-7.

1 – вимірювальна комірка; 2 – блок бічної активної теплоізоляції; 3 – блок охолодження; 4 – притискний пристрій; 5 – досліджуваний зразок; 6 – перетворювач теплового потоку; 7, 8, 9 – електричні нагрівачі; 10 – радіатор; 11, 12 – тепла ізоляція; 13 – станина.

– діапазон значень вимірюваних коефіцієнтів теплопровідності від 0,03 до 3,0 Вт/(м·К);

– межі допустимої основної відносної похибки вимірювання коефіцієнта теплопровідності $\pm 6\%$;

– діапазон значень середньої температури зразка від -40 до $+135$ °С.

До складу установки входить тепловий блок, призначений для розміщення досліджуваного зразка, завдання умов експерименту та отримання первинної вимірювальної інформації, та електронний блок, що забезпечує автоматизоване регулювання теплових режимів, збір та оброблення вимірювальної інформації і передачу результатів на персональний комп'ютер для подальшої обробки результатів вимірювання. На рис. 1 показано конструктивну схему теплового блоку установки ІТ-7.

В установці ІТ-7 досліджуваний зразок розташовується між двома плоскими перетворювачами теплового потоку (ПТП – квадратні

пластини 300×300 мм, рис. 2). В центральній зоні ПТП розміщено чутливий елемент (батарея термопар), електричний сигнал якого пропорційний густині теплового потоку. Для більш точного вимірювання різниці значень температури на поверхнях зразка між ПТП та зразком вставлено тонкі гумові пластини, на поверхнях яких розташовано спаї диференційної термопари.

Комірку зі зразком розміщено між плоскими нагрівачем та холодильником, температура яких підтримується на заданому рівні за допомогою регуляторів (на рис. 2 не показані). Для зменшення бокових тепловтрат застосовуються бокові екрани з регульованою температурою, яка задається такою, що дорівнює середній температурі зразка. При випробуванні сипких матеріалів застосовують спеціальні контейнери, які формують зразок у вигляді пластини.

Метод дослідження базувався на:

1. створенні стаціонарної різниці температур між двома поверхнями зразка матеріалу (пластини);
2. вимірюванні цієї різниці температур, густини теплового потоку крізь зразок та товщини цього зразка;
3. обчисленні коефіцієнта теплопровідності зразка за результатами вимірювань. Застосування цього методу для будівельних матеріалів нормовано згідно з [5, 6].

Перед та після проведення досліджень зразків матеріалів у комірку пристрою по чергово встановлювались робочі еталони теплопровідності (органічне скло марки СОЛ товщиною 49,28 мм та оптичне скло ЛК-5 товщиною 49,98 мм) і проводились дослідження їх теплопровідності в робочому діапазоні температур та визначались похибки вимірювань. Потім виконувалась робота з підготовки зразків ґрунту: засипання їх у пінопластову рамку, яку зверху й знизу обмежено пластинами з органічного скла товщиною 1 мм.

Зразки встановлювались в установку, де знаходились під тиском, що задається пружиною притискного пристрою. При випробуваннях тиск на поверхню зразка задавався приблизно 20 кПа. Товщина зразка вимірювалась під дією вказаного вище тиску безпосередньо в установці ИТ-7, у чотирьох точках з точністю 0,01 мм.

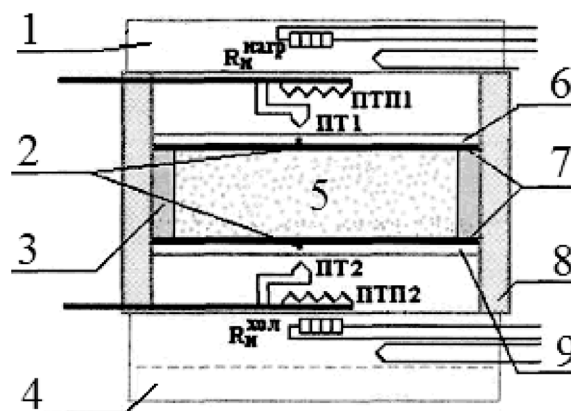


Рис. 2. Схема розміщення зразка в тепловому блоці установки ИТ-7.

- 1 – нагрівач; 2 – спаї термопар на гумових пластинках; 3 – пінопластова рамка; 4 – холодильник; 5 – зразок; 6 – гумова пластина; 7 – пластина з оргскла; 8 – боковий екран; 9 – гумова пластина.

Необхідні температури нагрівача та холодильника задавали за допомогою регуляторів (перепад температур між ними складав 6 К). Після досягнення стаціонарного режиму, про що свідчив графік зміни сигналів перетворювачів, який будовався на дисплеї комп'ютера, проводився 30-ти хвилинний запис сигналів. При обробці даних було визначено середні вихідні напруги перетворювачів у стаціонарному режимі та за формулою (1) розраховано коефіцієнти теплопровідності зразків ґрунту. Відповідна температура віднесення визначалась як середня між температурою сторін вимірювальної комірки. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності проводились в діапазоні температур від -20 до $+35$ °С. Усі вимірювання, крім тих, що виконані за температури 35 °С, відбувались у холодильній камері.

Електричні сигнали перетворювачів теплового потоку і температури вимірювались та передавались на персональний комп'ютер для подальшої обробки. Коефіцієнт теплопровідності зразка λ визначався згідно з формулою

$$\lambda_{\text{зр}} = \frac{(H_{\text{конт}} - H_{\text{скл}})}{2\Delta T} \frac{H_{\text{скл}}}{q_1 + q_2} \frac{1}{\lambda_{\text{скл}}}, \quad (1)$$

де q_1, q_2 – густини теплового потоку крізь ПТП₁ та ПТП₂, що визначались відповідно як:

$$q_1 = K_1(T_1)E_{\text{ПТП}_1}, \quad (2)$$

$$q_2 = K_2(T_2)E_{\text{ПТП}_2}, \quad (3)$$

$$H_{\text{скл}} = 0,002 \text{ м.}$$

Температури T_1 та T_2 визначено перетворювачами ПТ₁ та ПТ₂, а різницю значень температури ΔT – виміряно диференційною термопарою.

Крім зазначених вище пристроїв та приладів, при вимірюваннях використовувались: холодильна камера – для проведення дослідів при температурі, нижчій за кімнатну; шафа сушильна електрична лабораторна СНОЛ – для сушіння навіски зразка з метою визначення його вологості.

Визначення питомої теплоємності зразків ґрунту

Дослідження проводились за методикою експериментального визначення температурної залежності питомої теплоємності вологомістких матеріалів в диференційному скануючому калориметрі ДСМ-2М [7].

Дослідження було розпочато підбором та підготовкою до вимірювань герметичних контейнерів однакової маси (допустиме відхилення складає $\pm 0,05$ мг). Зокрема, було здійснено попередній запис залежності амплітуди відхилення ДСК-кривих зразків від базової лінії в залежності від температури та визначено оптимальні значення чутливості приладу, швидкості сканування і маси зразка ґрунту. Проведено розподіл робочого температурного діапазону на інтервали і реєстрацію в кінцевій точці кожного інтервалу амплітуди відхилення від базової лінії в процесі релаксації сигналу до базової лінії після переведення калориметра з режиму сканування в ізотермічний режим.

Під час визначення питомої теплоємності знімали такі показники:

1. Відхилення від базової лінії амплітуди відхилення ДСК-кривої, коли в обох калориметричних комірках розміщено порожні контейнери однакової маси;

2. Відхилення амплітуди відхилення ДСК-кривої еталону, коли в калориметричній комірці

розміщено еталонну речовину (корунд) з відомою теплоємністю і масою, в іншій комірці – пустий контейнер;

3. Відхилення амплітуди відхилення ДСК-кривої зразків від базової лінії, коли в робочій калориметричній комірці знаходиться один із зразків ґрунту, а в іншій комірці – пустий контейнер.

Розрахунок теплоємності здійснювався за формулою

$$C_s = \frac{(Y_s \pm Y)m_r C_r}{(Y_r \pm Y)m_s} \quad (4)$$

Тут необхідно враховувати, що якщо відхилення не співпадають за напрямком, то абсолютні значення відхилень Y_r і Y_s підсумувати з Y .

Результати досліджень

Результати досліджень коефіцієнтів теплопровідності зразків ґрунту, здійснені методом пластини на установці ИТ-7, наведено в табл. 1. Значення вологості зразків визначено методом сушіння до незмінної маси в печі за температури 140°C.

На рис. 3 і 4 наведено графіки залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури зразків № 1 та № 2 відповідно. Зазначимо, що графіки залежності коефіцієнтів теплопровідності від температури зразків № 1 та № 2 відповідно для від'ємних і додатніх температур подано окремо, оскільки в зоні, близькій до нуля, відбувається розрив прямих внаслідок зміни агрегатного стану води, що міститься в ґрунті.

Для моделювання залежностей коефіцієнтів теплопровідності зразків ґрунту № 1 та № 2 від температури, що задані таблично, методом найменших квадратів були побудовані лінії апроксимації (рис. 3, 4), що приблизно описують даний процес. Криві мають лінійні типи апроксимуючих функцій з відповідними значеннями коефіцієнта кореляції R^2 вказаних апроксимацій:

зразок №1:

– в області з від'ємними температурами:

$$\lambda = 0,0027T + 1,17 ; R^2 = 0,97; \quad (5)$$

– в області з додатніми температурами:

Табл. 1. Результати досліджень коефіцієнтів теплопровідності

№ зразка	Товщина зразка, мм	Середня температура зразка, °С	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К)	Відносна вологість зразка, %	Густина зразка у сухому стані, г/см ³
1	50,99	- 19,0	1,12	10,0	1,92
		- 9,8	1,14		
		- 4,9	1,16		
		4,9	0,95		
		19,5	1,06		
		27,5	1,16		
		39,2	1,23		
2	46,57	- 19,5	2,35	13,5	2,13
		- 9,7	2,30		
		- 4,9	2,24		
		4,9	1,70		
		29,5	1,82		
		39,1	1,82		

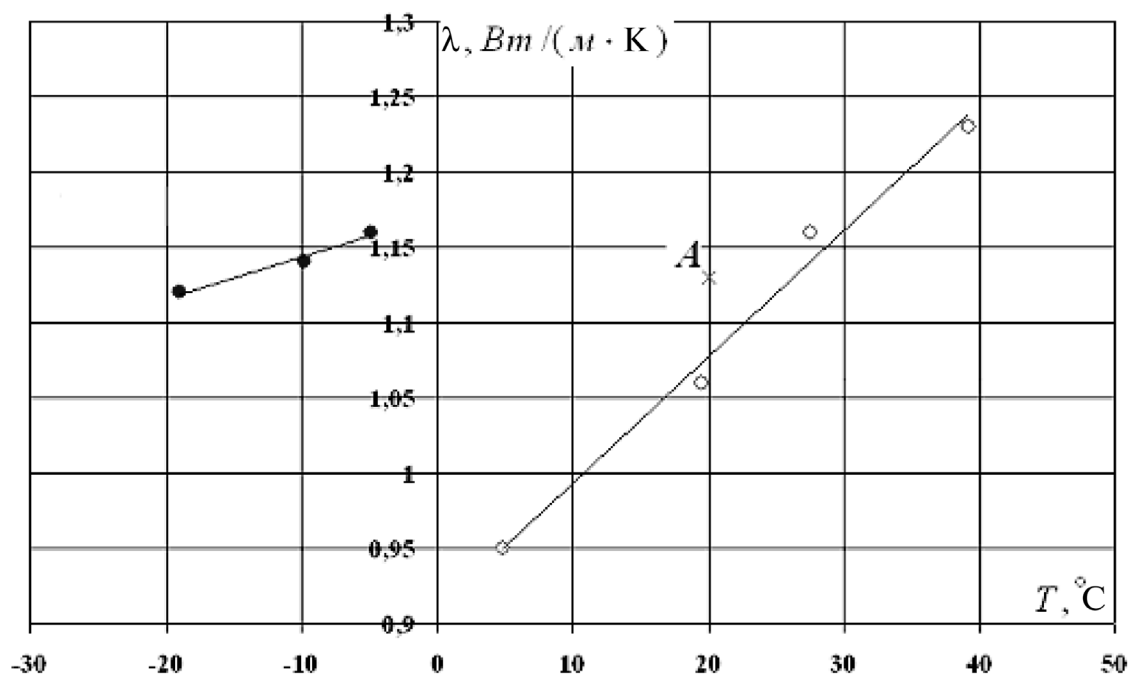


Рис. 3. Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка № 1 від температури.

$$\lambda = 0,0084T + 0,914 ; R^2 = 0,98; \quad (6)$$

— в області з додатніми температурами:

зразок №2:

$$\lambda = 0,0039T + 1,68 ; R^2 = 0,93; \quad (8)$$

— в області з від'ємними температурами:

$$\lambda = -0,0069T + 2,22 ; R^2 = 0,94; \quad (7)$$

В табл. 2 наведено результати досліджень питомої теплоємності зразків ґрунту, що проводились за методикою експериментального визначення

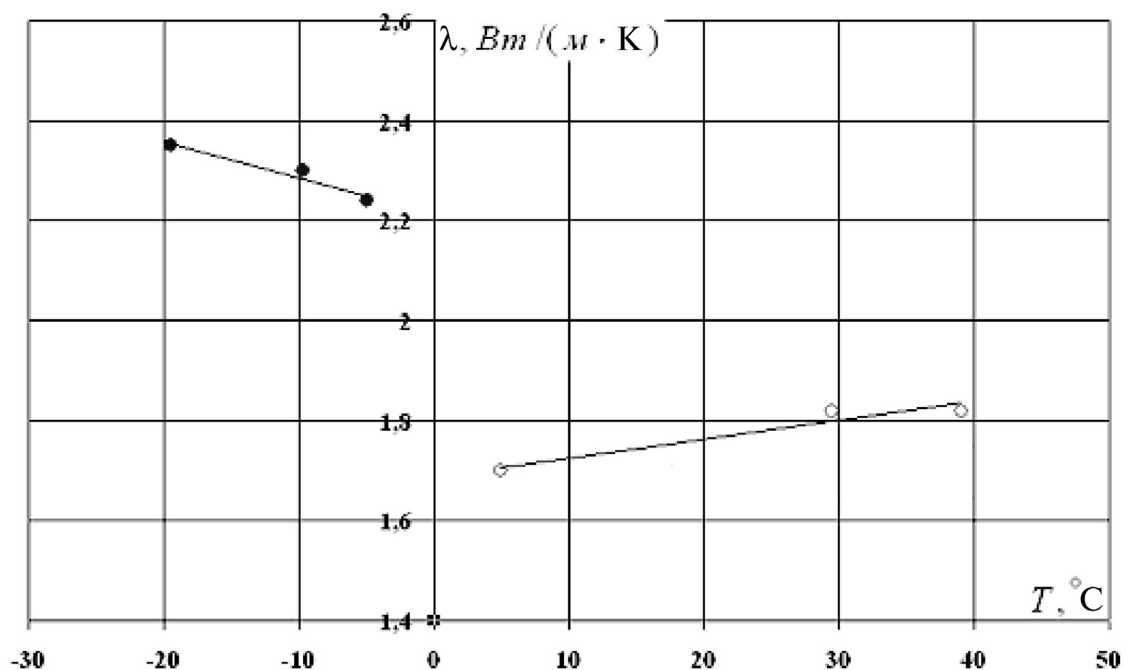


Рис. 4. Залежність коефіцієнта теплопровідності зразка № 2 від температури.

Табл. 2. Результати досліджень питомої теплоємності ґрунту

№ зразка	Температура, °C	Теплоємність, Дж/г К	Відносна вологість зразка, %
1	15	1,072	10,24
	25	1,093	
	35	1,091	
	45	1,122	
	55	1,127	
	65	1,142	
	75	1,164	
	85	1,178	
	95	1,212	
2	15	1,212	14,90
	25	1,244	
	35	1,246	
	45	1,272	
	55	1,281	
	65	1,283	
	75	1,301	
	85	1,309	
	95	1,335	

температурної залежності питомої теплоємності вологістких матеріалів у диференціальному скануючому калориметрі ДСМ-2М.

Графіки температурних залежностей питомої теплоємності ґрунту зразків № 1 та № 2 відповідно наведено на рис. 5. Для кожного із

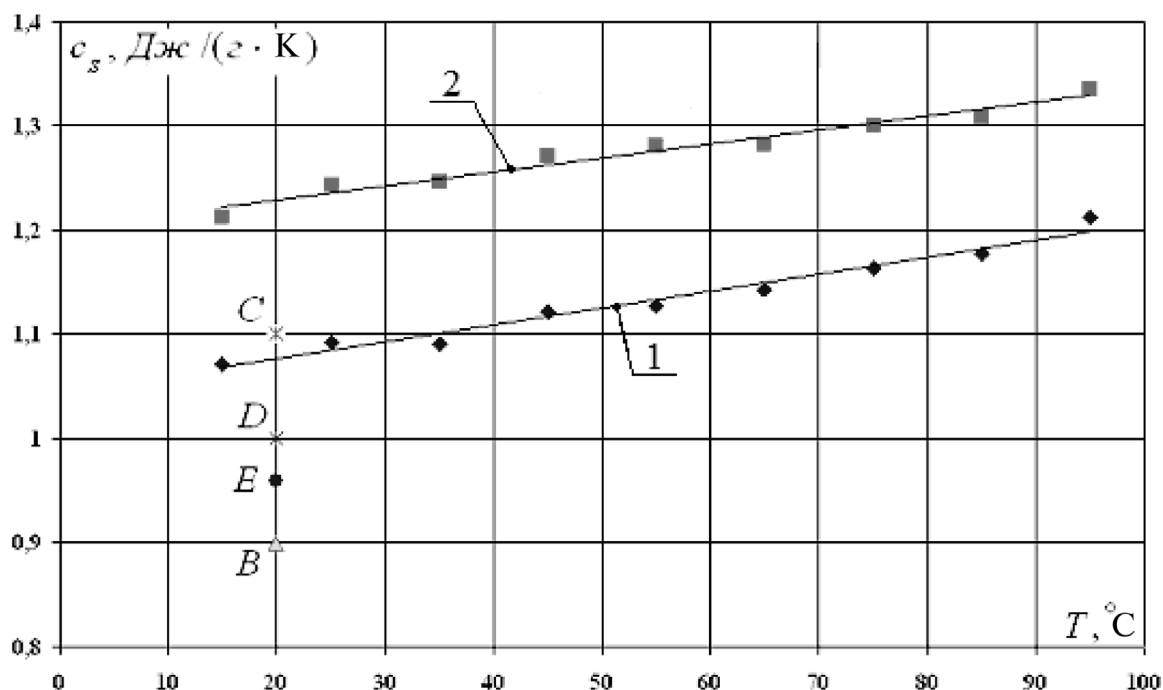


Рис. 5. Температурні залежності питомої теплоємності ґрунту зразків № 1 (1) та № 2 (2).

зразків побудовано лінії апроксимації $C_s = mT + b$ (де m – тангенс кута нахилу лінійної регресії до осі абсцис; b – координата точки перетину лінійної регресії з віссю ординат) з відповідними величинами коефіцієнтів апроксимації R^2 :

зразок №1:

$$C_s = 0,00163T + 1,044 ; R^2 = 0,98; \quad (9)$$

зразок №2:

$$C_s = 0,00135T + 1,202 ; R^2 = 0,98. \quad (10)$$

Значення величини R^2 характеризує вірогідність апроксимації. Оскільки значення $R^2 \approx 1$, то можна з впевненістю стверджувати, що лінії тренда в усіх випадках адекватно апроксимують досліджувані залежності коефіцієнтів теплопровідності та питомої теплоємності зразків ґрунту № 1 та № 2 від температури.

Аналіз результатів

Для встановлення структурного типу зразків ґрунту було проведено порівняльний аналіз літературних даних коефіцієнтів теплопровідності та питомої теплоємності робіт [8–15] з близьких за складом ґрунтів (табл. 3) в досліджуваному інтервалі температур.

Виходячи з того, що межі допустимої похибки вимірювання можуть становити 5...8% та враховуючи зовнішній вигляд зразків № 1 та № 2, з всього представленого спектра значень теплофізичних властивостей ґрунтів з [8–15] було виділено і нанесено на рис. 3 та 5 такі табличні значення коефіцієнтів теплопровідності та питомої теплоємності матеріалів, відповідно: т. *A* – пісок річний дрібний вологий [8]; т. *B* – глина [8]; т. *C* – піщаний ґрунт [9]; т. *D* – утрамбована земля [9]; т. *E* – піщаник глиновапняковий [9]. В результаті порівняння літературних даних [8–15] з отриманими експериментальними результатами встановлено, що розбіжність значень коефіцієнта теплопровідності не перевищує 4,6%, а середній розбіг значень питомої теплоємності сягає 10%. Таке задовільне узгодження підтверджує припущення щодо попередньо орієнтовно вибраного типу ґрунтів – це суміш глини з домішками піску.

Висновки

1. Проведені дослідження дали змогу експериментально: встановити характер зміни теплофізичних параметрів (коефіцієнтів теплопровідності та питомої теплоємності) реальних

Табл. 3. Значення теплофізичних величин ґрунтів з джерел [8-15]

Джерело даних	Тип ґрунту	Температура, °С	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К)	Теплоємність, Дж/г·К
[8]	Глина (т. В, рис. 5)	20	0,9...0,7	0,840
	Пісок річний дрібний сухий	0...160	0,30...0,38	0,800
	Пісок річний дрібний вологий (т. А, рис. 3)	20	1,13	2,090
[9]	Глина	20	-	0,880
	Піщаний ґрунт (т. С, рис. 5)	20	-	1,1...3,2
	Земля волога	20	-	2,000
	Земля суха	20	-	0,840
	Земля утрамбована (т. D, рис. 5)	20	-	1,0...3,0
	Піщаник глиновапняковий (т. E, рис. 5)	20	-	0,960
[10]	Глина	-	-	0,795
	Піщаник	0...100	-	0,921
	Пісок	20...100	-	0,795
[11]	Пісок	-	-	0,835
	Ґрунт	-	-	0,800
	Ґіпс	-	-	1,090
[12]	Глина	-	-	0,7...0,93
[13]	Глина	0...100	-	0,920
	Пісок сухий	0...100	-	0,800
[14]	Пісок сухий	-	0,326	-
	Пісок вологий	-	1,128	-
	Пісок	-	-	0,79
	Глина	-	-	0,84...1,05
[15]	Суглинки і глина (талі)	-	1,280	-
	Суглинки і глина (мерзлі)	-	1,390	-
	Супісок з домішками ґрунту (талій)	-	1,740	-
	Супісок з домішками ґрунту (мерзлий)	-	1,860	-

ґрунтових масивів в залежності від температури; визначити відносну вологість зразків ґрунту; встановити тип ґрунтів: глина з вологим піском.

2. Вказані результати в подальшому було використано для розрахунків ґрунтових теплообмінників при проектуванні дослідно-промислового зразка ґрунтового горизонтального акумулятора теплонасосної системи теплопостачання приміщень 1 корпусу ІТТФ НАН України по вул. Булаховського, 2.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Viessmann*. Системы тепловых насосов. Инструкция по проектированию. (5829 122-2 GUS 2/2000).
2. *Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Воробьев Л.И., Менделеева Т.В., Бурова З.А., Шаповалов В.И.* Теплометрический прибор для определения коэффициента теплопроводности твердых материалов (в обеспечение ГОСТ 7076-99)// Тезисы XI Российской конференции по теплофизическим

свойствам веществ, окт. 2005, С.-Петербург – Т.2, – С. 134–135.

3. Бурова З.А., Гайдучек А.В., Ковтун С.И. Проблемы измерения теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов // Пром. теплотехника. – 2004. – Т. 26, № 6. – С. 205–209.

4. Дифференциальный сканирующий микрокалориметр ДСМ-2М. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. СКБ БП АН СССР, г. Пушкино, 1978. – 40 с.

5. ГОСТ 7076-99 Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме.

6. ISO 8301:1991 Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus (Теплоизоляция. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик. Прилад із перетворювачем теплового потоку).

7. Михайлик В.А., Снежкин Ю.Ф., Немчин А.Ф., Давыдова Е.О. Определение теплоёмкости влаго-

содержащих материалов с помощью сканирующей калориметрии // Пром. теплотехника. – 2002. – Т.24, №5. – С. 92–96.

8. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. (Изд. 4, переработанное и дополненное) – М.: Энергоиздат, 1981. – 417 с.

9. www.vactekh-holod.ru

10. Теплотехнический справочник. Том 1. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.

11. www.ru.wikipedia.org

12. www.courses.edu.nstu.ru

13. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1987. – 587 с.

14. Енохович А.С. Справочник по физике. – М.: Просвещение, 1978. – 415 с.

15. СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.

Получено 05.03.2008 г.

УДК 681.122

Тонконогий Ю.¹, Пядишюс А.¹,
Станкявичюс А.¹, Круковский П.²

¹Литовский энергетический институт

²Институт технической теплофизики НАН Украины

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТУРБИННЫХ СЧЕТЧИКОВ ГАЗА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ПОТОКЕ

Розроблено новий метод розрахунку обертання турбінного лічильника газу в перехідному режимі. Наведені приклади застосування методу.

Разработан новый метод моделирования вращения турбинного счетчика газа в нестационарном потоке. Приведены примеры применения метода.

A new method for simulation of the rotation of a turbine gas meter in a transitional flow has been developed. Examples of the application of this method are presented.

f – частота пульсации расхода;

J – момент инерции ротора;

k_Q – коэффициент расхода;

Q – расход газа;

T – постоянная времени инерции вращения;

t – время;

δ – динамическая погрешность счетчика;

ρ – плотность газа;