

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ

Методичні вказівки до лабораторної роботи
з курсу «Теплотехнічні вимірювання та прилади»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 28.06.2023 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

Вимірювання параметрів вологого повітря: методичні вказівки до лабораторної роботи з курсу «Теплотехнічні вимірювання та прилади» для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» усіх форм навчання / уклад. О. Р. Пересьолков, О. В. Круглякова. – Харків: НТУ "ХПІ", 2023. – 19 с.

Укладачі: О. Р. Пересьолков

О. В. Круглякова

Рецензент Т.М. Пугачова

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

ВСТУП

Атмосферне повітря, що складається з кисню, азоту, вуглекислого газу і невеликої кількості інертних газів (аргон, неон, гелій, ксенон і криптон), завжди містить деяку кількість водяної пари. Механічна суміш сухого повітря з водяною парою називається вологим повітрям, або повітряно-паровою сумішшю.

Визначати параметри вологого повітря необхідно при проектуванні та експлуатації багатьох теплотехнічних процесів та установок. Підтримка постійної вологості є обов'язковою умовою для ткацького, кондитерського, фармацевтичного виробництва, електронної промисловості, виробництва високоточної оптики, для музеїв та бібліотек. Знання параметрів вологого повітря потрібне при розрахунках систем вентиляції та кондиціонування повітря, процесів горіння палива і, особливо, при розрахунку процесів, що протікають у сушильних установках. Параметри повітря визначають комфортні умови для перебування людей в приміщеннях різного призначення.

Кількість молекул пари в 1 кг сухого повітря і температура повітря за сухим термометром зумовлюють параметри повітря, а саме: температуру за мокрим термометром t_m , температуру точки роси t_p , вологовміст d , г/кг.с.п., ентальпію або тепловміст I , кДж/кг.с.п., відносну вологість ϕ , %, парціальний тиск водяної пари p_p , Па.

Для розрахунку і знаходження параметрів вологого повітря достатньо виміряти два його параметри, а за ними розраховуються інші параметри, причому для полегшення можна використовувати психрометричні таблиці або $I-d$ діаграму.

При психрометричному способі вимірювання експериментально визначається температура за сухим t і мокрим t_m термометрами. Після цього за допомогою $I-d$ діаграми або таблиць розраховуються інші параметри вологого повітря.

Конденсаційний спосіб вимірювання засновано на виникненні явища провідності плівки води на поверхні кристала солі при конденсації на ній водяної пари з вологого повітря. Для цього датчик поступово охолоджується

до температури точки роси t_p , °C, яка фіксується в цей момент. Другий параметр, який також вимірюється – це температура за сухим термометром t .

Гігрометричний спосіб вимірювання заснований на вимірюванні відносної вологості повітря та температури за сухим термометром. Датчик – це гігроскопічний матеріал, який поглинає молекули води з повітря, і в залежності від цього змінюються параметри датчика. В механічних гігрометрах змінюється довжина капронової волосини; в електричних пристроях – опір, ємність, резонансна частота та інші електричні параметри гігроскопічного матеріалу.

Мета роботи: Вивчити та практично засвоїти способи вимірювання параметрів волого повітря.

Завдання роботи: Вивчити, здобути навички вимірювання та наступних розрахунків параметрів волого повітря при застосуванні різних приладів і методів. Розуміти особливості використання психрометричного, конденсаційного та гігрометричного способів вимірювання параметрів вологого повітря.

1 ОПИС СХЕМИ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Лабораторна установка має п'ять модулів для вимірювання параметрів вологого повітря, як показано на рис. 1.

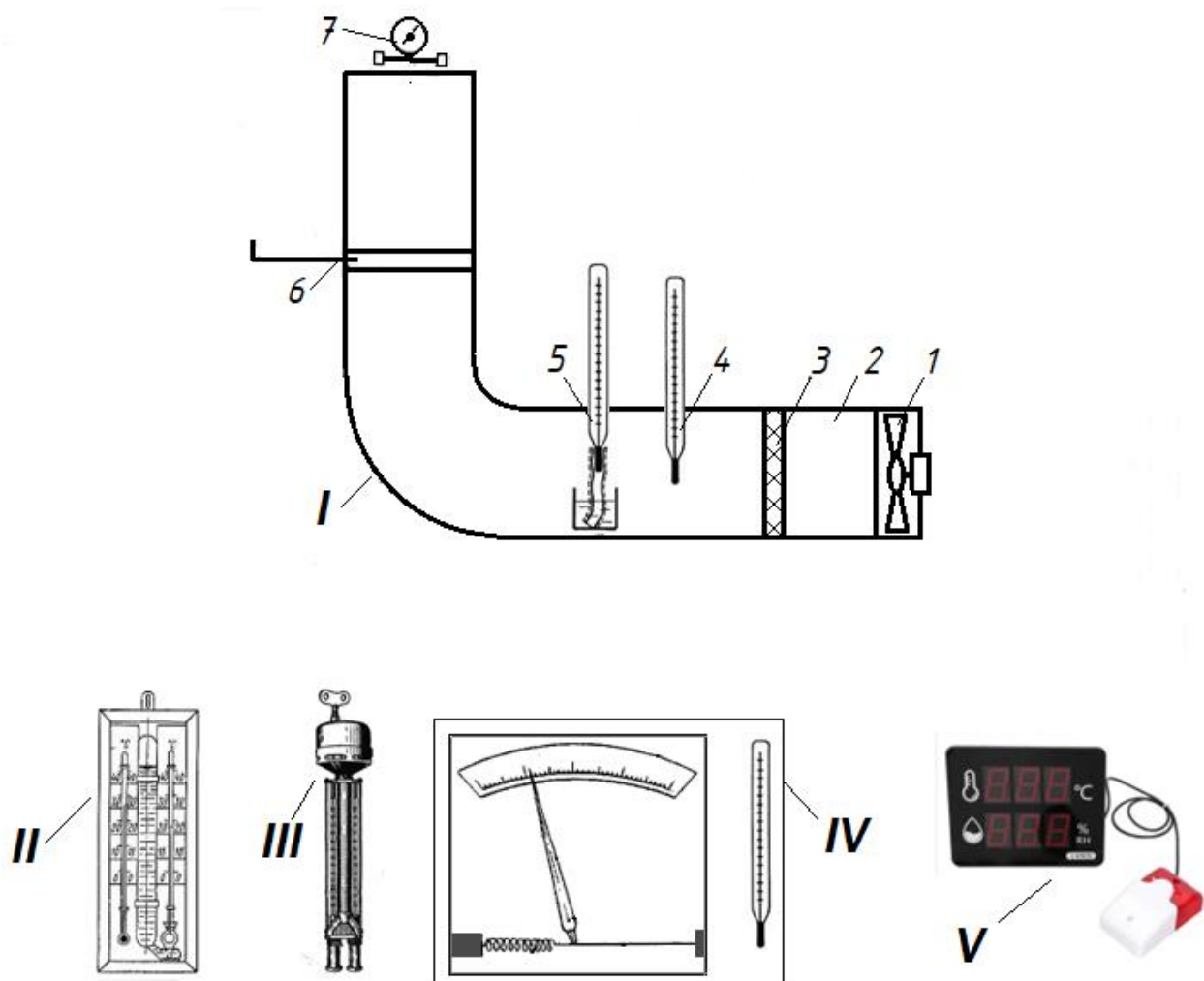


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки:

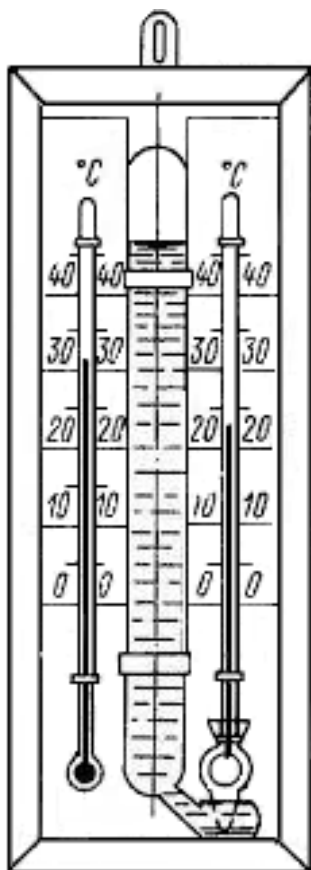
I – модуль для дослідження впливу швидкості обдуву мокрого термометра на його показання; II – психрометр; III – психрометр Ассмана; IV – гігрометр механічний;
V – гігрометр електричний;

1 – вентилятор; 2 – газохід; 3 – газорозподільча решітка; 4 – рідинний термометр розширення «сухий»; 5 – «мокрый» термометр; 6 – регулююча засувка; 7 – крильчатий анемометр

Модуль I дозволяє експериментально дослідити, як на показання мокрого термометра впливає швидкість обдуву датчика. Повітря в газохід подається вентилятором. Газорозподільча решітка вирівнює поле швидкості повітря по зрізу труби. Сухий і мокрий термометри мають ціну поділки 0,1 °С.

Тканинний чохольчик на балончику мокрого термометра змочується з ампулки з водою. Швидкість руху повітря регулюється засувкою і вимірюється крильчатим анемометром.

Модуль II – це психрометр, який показує температуру за сухим і мокрым термометрами в майже спокійному повітрі. По їх значенням за таблицею знаходиться відносна вологість.



Психрометрична таблиця

Покази сухого термометра, °C	Різниця показів сухого і вологого термометрів, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	82	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Відносна вологість, %

Рисунок 2 – Схема психрометра та психрометрична таблиця

Модуль III – це психрометр Ассмана (рис. 3), в якому вентилятором з пружинним заводом або електромотором здійснюється обдув змоченого водою тканинного чохольчика на мокрому термометрі. Інші параметри розраховуються за показаннями сухого і мокрого термометрів.

Модуль IV – це гігрометр механічний. Робочим гігроскопічним елементом, який поглинає молекули води з повітря, є натягнута волосінь, довжина якої змінюється в залежності від вологості повітря і потім через важіль і шарнір відбувається переміщення стрілки. Відлік на шкалі пристрою є в одиницях виміру відносної вологості ϕ , %.

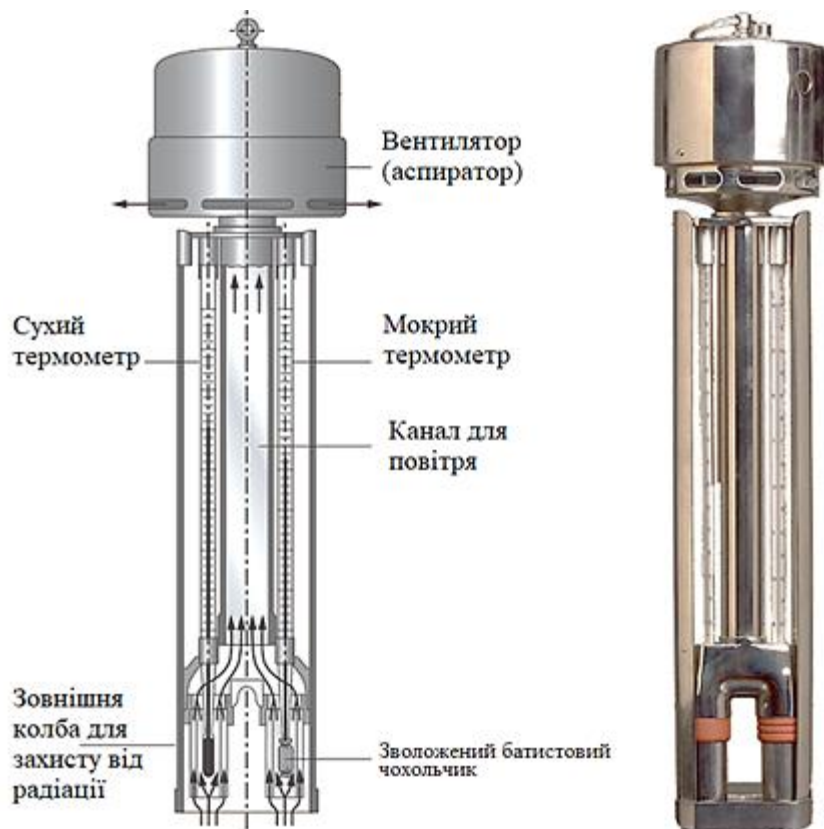


Рисунок 3 – Психрометр Ассмана

Модуль V – це гігрометр електричний, в якому в залежності від кількості поглиненої датчиком вологи змінюється його провідність, тобто опір. На індикаторі висвітлюється відносна вологість повітря ϕ , % та температура за сухим термометром, що вимірюється вбудованим термометром опору.

Інші параметри волого повітря розраховуються за таблицями або за $I-d$ діаграмою.

2 ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДІВ І РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ

2.1 Проведення дослідів на модулі I

УВАГА! Лабораторна робота виконується під керівництвом викладача і майстра виробничого навчання.

При роботі з модулем I виконуються п'ять вимірювань одночасно швидкості руху повітря в газоході і показань сухого і мокрого термометрів. При використанні крильчатого анемометра треба вимірювати тривалість часу

τ , с, за який на індикаторі стрілка проходить $N = 100$ або 200 поділок, а також показання сухого t , °С, та вологого t_m , °С термометрів. Заздалегідь перед дослідами треба змочити тканинний чохоцьчик на мокрому термометрі.

Показання приладів заносимо до табл. 1.

Таблиця 1 – Показання приладів на модулі І

№ модуля	№ з/п	Найменування показань приладів	Розмірність	Відмітка положення засувки					
				1	2	3	4	5	
І	1	Вимірювання швидкості руху повітря крильчатим анемометром	Тривалість заміру, τ	с					
			Кількість поділок по шкалі індикатора, N	шт					
	2	Температура за сухим термометром, t	°С						
3	Температура за мокрим термометром, t_m	°С							

Результати вимірювань температур t і t_m на модулі І доцільно представити графічно, як, наприклад, показано на рис. 4.

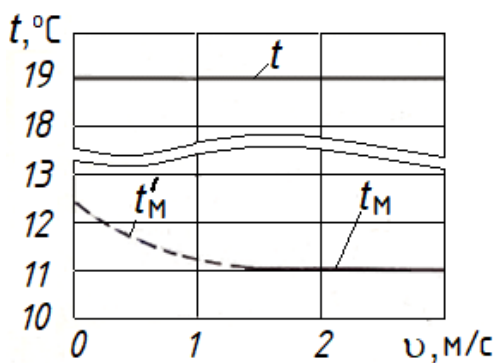


Рисунок 4 – Очікувані результати вимірювань на модулі І температур за сухим t та мокрим t_m термометрами:

при швидкості обдуву $v = 0$ м/с: $t = 19$ °С; $t'_m = 12,4$ °С; $\delta t'_m = 20$ %; $\Delta t'_m = 1,4$ °С;
 $\Delta t_{II} = 19 - 12,4 = 6,6$ °С;

при $v > 1,5$ м/с: $t = 19$ °С; $t_m = 11$ °С; $\Delta t_{II} = 19 - 11 = 8$ °С

Порівнюючи показання t'_m при швидкості $v = 0$ м/с та t_m при $v > 1,5$ м/с потрібно знайти абсолютну похибку вимірювань $\Delta t'_m = t'_m - t_m$, °С; відносну

похибку $\delta t'_m = (\Delta t'_m / t_m) 100, \%$; і психрометричну різницю температур $\Delta t_{\Pi} = t - t_m, ^\circ\text{C}$.

Результати вимірювань доцільно порівняти з розрахунком значень $\Delta t'_m$, $\delta t'_m$, Δt_{Π} , скориставшись номограмою на рис. 5.

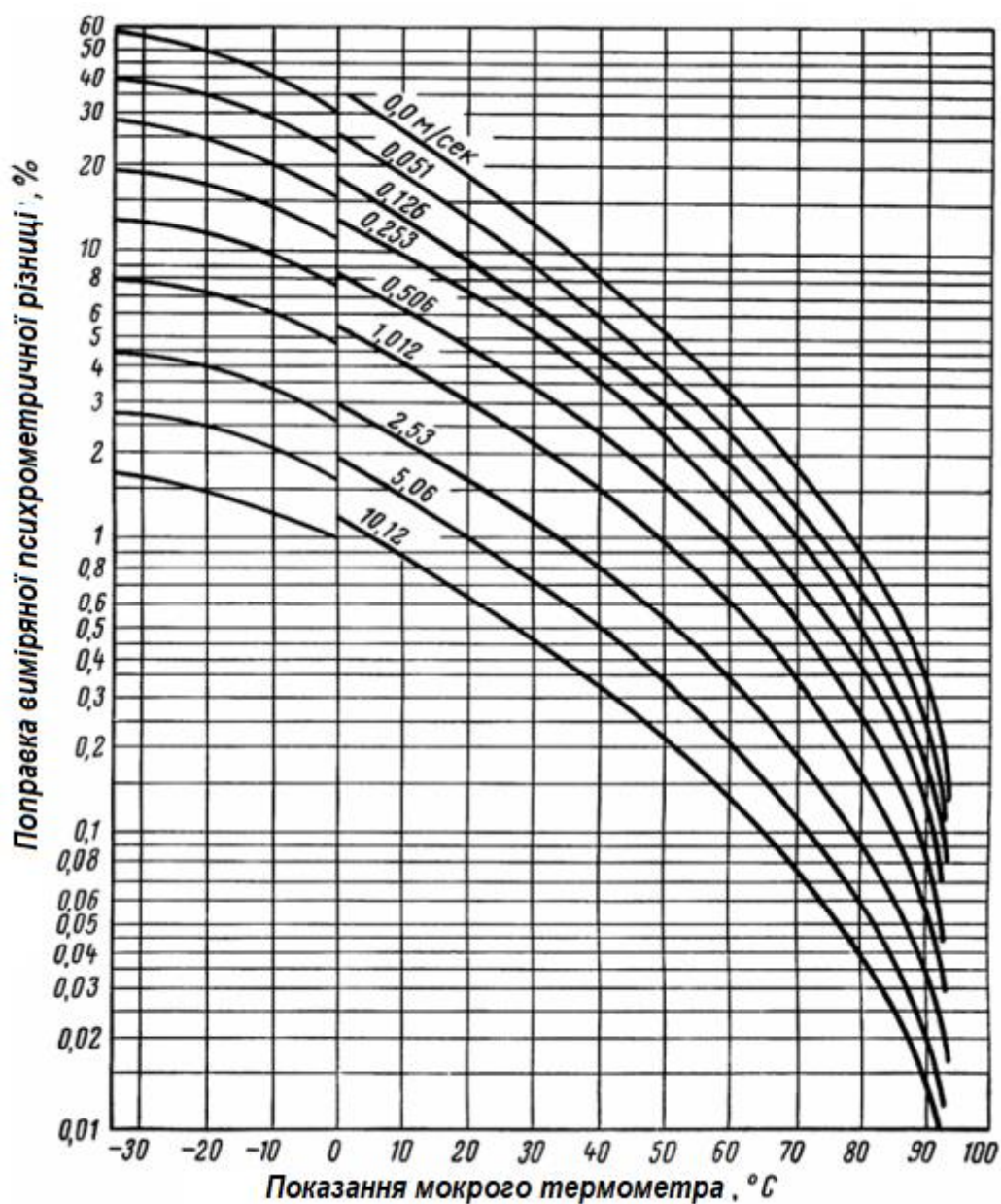


Рисунок 5 – Залежність помилки δ (%) заміряної психрометричної різниці температур $\Delta t_{\Pi} = t - t_m$ від показань мокрого термометра та швидкості руху повітря

Особливо доцільно вводити поправку на швидкість обдуву мокрого термометра при вимірюванні параметрів доволі сухого повітря з підвищеною температурою, як це показано в додатку Д1.

2.2 Проведення дослідів на модулях II, III, IV і V

При роботі з модулями II і III вимірюються показання за сухим та мокрим термометрами, а на модулях IV і V вимірюються значення відносної вологості та температури за сухим термометром. Ці показання заносяться до табл. 2.

Таблиця 2 – Показання приладів на модулях II, III, IV та V

№ модуля	№ з/п	Найменування показань приладів	Розмірність	Значення
II	4	Показання температури за сухим термометром, t	°C	
	5	Показання температури за мокрим термометром, t_m	°C	
III	6	Показання температури за сухим термометром, t	°C	
	7	Показання температури за мокрим термометром, t_m	°C	
IV	8	Значення відносної вологості, φ	%	
	9	Показання температури за сухим термометром, t	°C	
V	10	Значення відносної вологості, φ	%	
	11	Показання температури за сухим термометром, t	°C	

3 ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ

За допомогою $I-d$ діаграми (рис. Д1) необхідно знайти всі параметри, які характеризують стан вологого повітря при проведенні вимірювань температур t і t_m на модулях II і III, та відносної вологості φ і температури t – на модулях IV і V (рис. 4).

Якщо за еталонні результати вимірювань і розрахунків прийняти дані психрометра Ассмана (модуль III), то доцільно порівняти з ним результати розрахунків всіх параметрів вологого повітря з модулів II, IV і V та оцінити

можливу похибку вимірювань, а, відповідно, й значень параметрів. Слід відмітити, що ці результати можуть ще більше проявлятися при вимірюванні параметрів повітря з високою температурою та малою відносною вологістю (як показано в додатку Д2).

При таких умовах некоректне знаходження параметрів вологого повітря може вплинути на результати проектування та умови експлуатації тепломасообмінних установок.

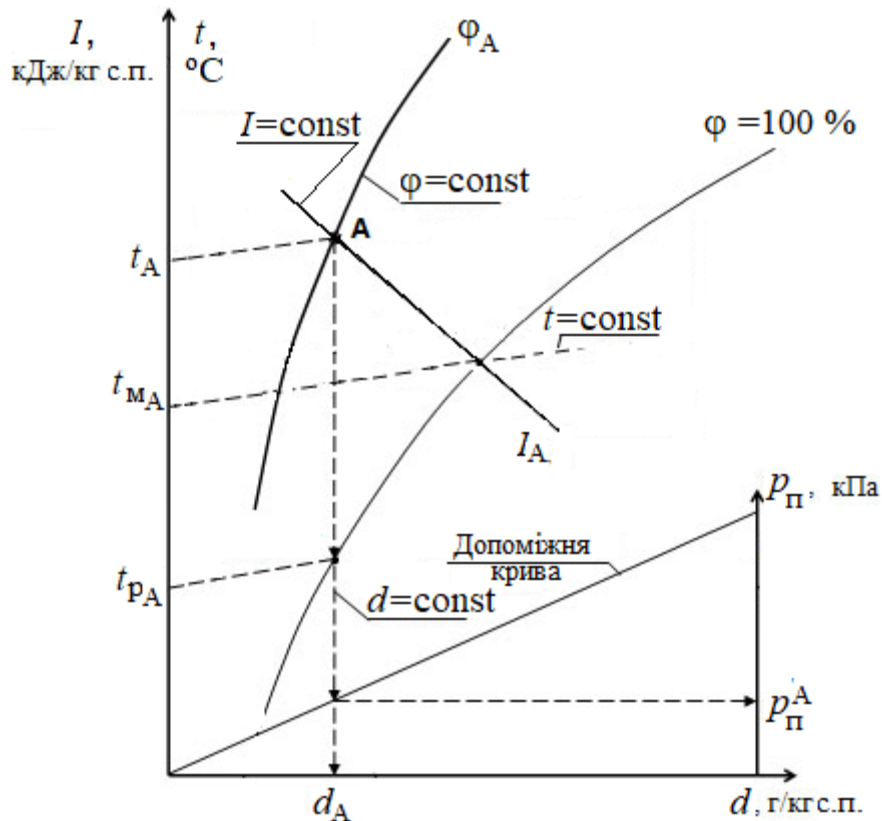


Рисунок 4 – Ілюстрація знаходження за допомогою $I-d$ діаграми всіх параметрів вологого повітря за результатами вимірювання в модулях I, II, III температур t і t_M , а в модулях IV і V – відносної вологості ϕ і температури t

4. ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТУ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

В звіт включаються:

1. схема установки та її опис;
2. таблиці та графіки вимірних та розрахованих параметрів вологого повітря;
3. висновки по результатах лабораторної роботи.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які існують способи вимірювання параметрів вологого повітря? Які параметри при цьому вимірюються?
2. Як можна зменшити похибку вимірювання показання мокрого термометра в спокійному повітря, тобто, без здійснення його обдуву?
3. За допомогою якого приладу можна перевірити достовірність показань гігрометра?

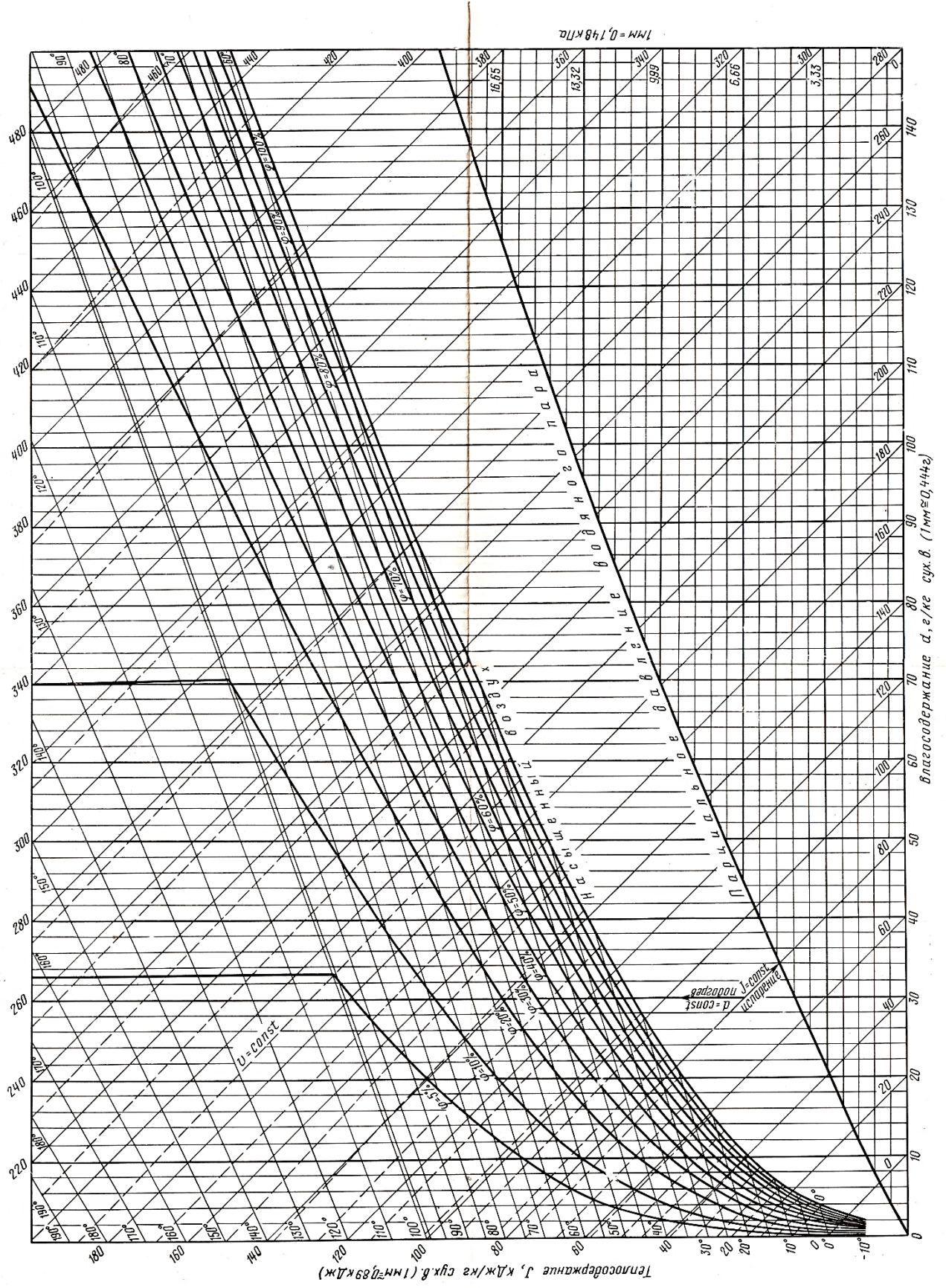
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бабіченко А. К. та ін. Промислові засоби автоматизації. 4.1. Вимірювальні пристрої. Харків: НТУ «ХП», 2001. 407 с.
2. Курилов А. Ф., Козін В. М. Теплотехнічні вимірювання і прилади. Суми: Сумський державний університет, 2015. 189 с.
3. Співак О.Ю. Теплотехнічні вимірювання та стандартизація. Лабораторний практикум. Вінниця: ВНТУ, 2017. 110 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

I-d діаграма вологого повітря



Додаток 2

Аналіз очікуваних результатів вимірювання t і t_M в умовах підвищеної температури

На рис. Д2,а показано очікувані результати вимірювання вологого повітря з низькою відносною вологістю та підвищеною температурою за сухим термометром, а на рис. Д2,б приведена ілюстрація знаходження параметрів вологого повітря на $I-d$ діаграмі, які зведені в табл. Д2.

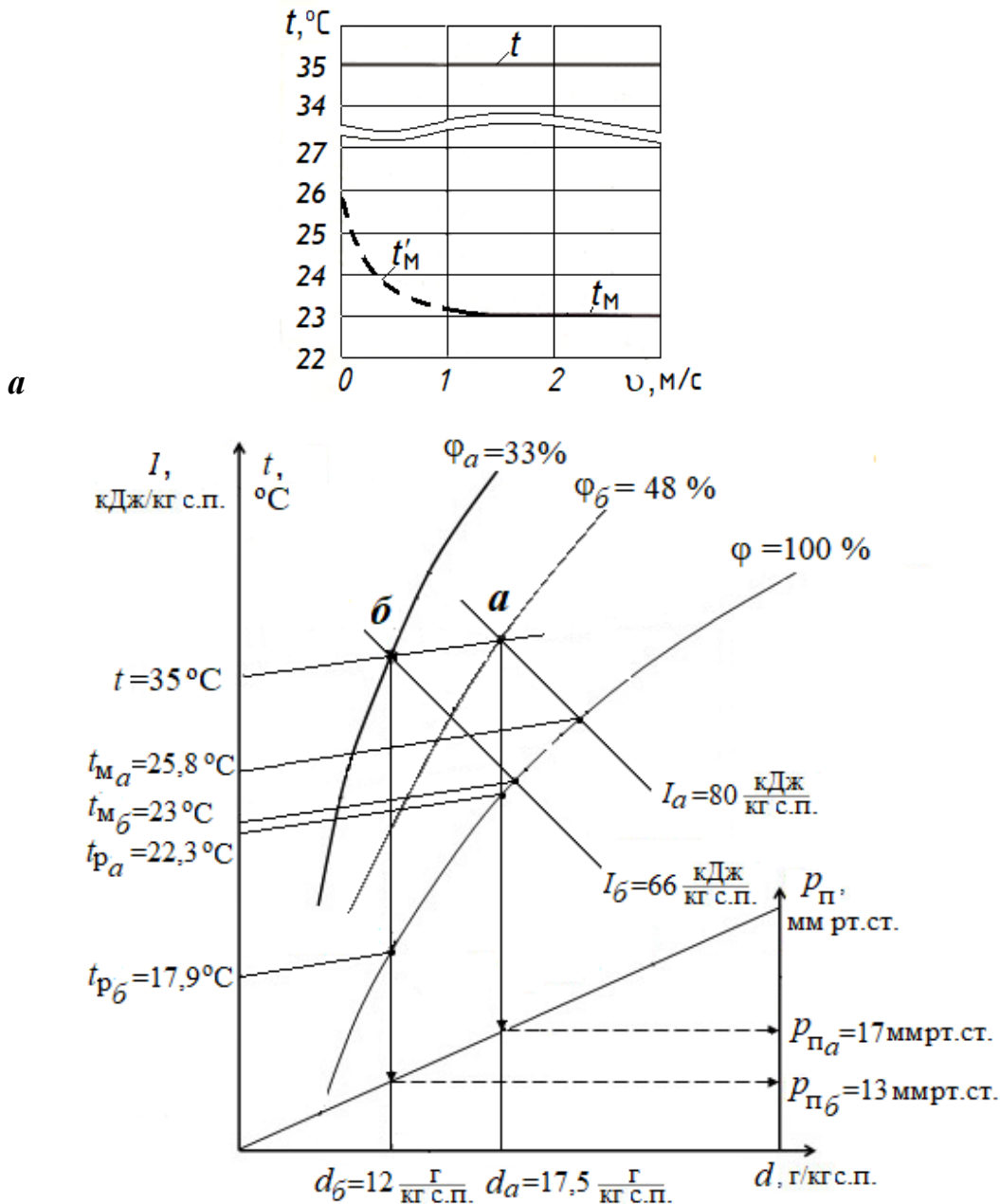


Рисунок Д2 – Аналіз результатів вимірювання параметрів вологого повітря з низькою відносною вологістю та підвищеною температурою:

a – очікувані результати вимірювання значень t_M при $t = 35$ °C та $\varphi = 33$ %; b – ілюстрація знаходження всіх параметрів вологого повітря за $I-d$ діаграмою

Таблиця Д2 – Порівняння параметрів вологого повітря, знайдених по $I-d$ діаграмі згідно очікуваних результатів вимірювання параметрів психрометричним способом (рис. Д2)

Позна- чення	Швид- кість, v , м/с	t	t_m	t_p	ϕ	d	I	p_p
		°С	°С	°С	%	г/кг сух.пов.	кДж/кг сух.пов.	мм.рт.ст
<i>a</i>	$v = 0$	35	25,8	22,3	33	17,5	80	17
<i>б</i>	$v > 1,5$	35	23	17,5	48	12	65	13

Як показано, розраховані параметри вологого повітря суттєво відрізняються при $v = 0$ м/с та при $v > 1,5$ м/с. Це може вплинути на результати проектних розрахунків та на умови експлуатації тепломасообмінних апаратів.

Додаток 3

Основні характеристики вологого повітря

Вологе повітря є сумішшю сухого повітря і водяної пари в перегрітому стані. Вологе повітря можна розглядати з деякими припущеннями як газову суміш, до якої застосовуються закони ідеального газу.

Закон Дальтона для суміші ідеальних газів: загальний тиск суміші $p_{\text{см}}$ в посудині дорівнює сумі парціальних тисків її компонентів. Кожен газ поводить себе так, ніби він є один у посудині, займаючи весь об'єм суміші.

$$p_{\text{см}} = p_{\text{с.п.}} + p_{\text{п.}},$$

де $p_{\text{с.п.}}$, $p_{\text{п.}}$ – парціальні тиски сухого повітря і водяної пари відповідно.

Вміст водяної пари у вологому повітрі може бути виражений по-різному: через абсолютну або відносну вологість, або вологовміст.

Абсолютна вологість характеризує масу водяної пари, яка міститься в 1 м^3 вологого повітря і чисельно дорівнює густині водяної пари. Таким чином, абсолютна вологість є об'ємною концентрацією пари. Концентрація вологи в повітрі може змінюватись. Повітря, яке здатне поглинати водяну пару, називається ненасиченим, причому ця його здатність до насичення залежить від температури. З підвищенням температури відстань між молекулами вологого повітря збільшується, отже повітря може прийняти більшу кількість водяної пари. При досягненні стану насичення повітря більше не здатне поглинати вологу, і надмірна волога починає конденсуватися. Здатність повітря до насичення характеризується відотною вологістю.

Відносна вологість – це відношення концентрації водяної пари ненасиченого повітря до концентрації водяної пари насиченого повітря при однакових температурах і тисках, тобто це відношення густини водяної пари за даних умов до її гранично можливої густини при тій же температурі і тому ж барометричному тиску

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}},$$

де $\rho_{\text{п}}$ – густина пари в ненасиченому стані (перегрітої пари), $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{н}}$ – густина пари в стані насичення (сухої насиченої пари), $\text{кг}/\text{м}^3$.

Відносну вологість повітря можна виразити з невеликою похибкою відношенням парціального тиску пари в повітрі до парціального тиску

насиченої водяної пари p_n за тієї ж температури. Помилка при припущенні, що водяна пара є ідеальним газом становить приблизно 1,5%, що цілком припустимо при інженерних розрахунках. Тоді відносна вологість повітря при температурі менше 100°C

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_n}$$

Відносна вологість вимірюється в частках від одиниці або у відсотках.

Вологовмістом вологого повітря називається маса водяної пари, яка знаходиться в 1 кілограмі сухого повітря, г/кг с.п.:

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{с.п.}}}$$

де $m_{\text{п}}$ і $m_{\text{с.п.}}$ – відповідно маси водяної пари та сухого повітря, кг.

Ентальпія вологого повітря – це тепловміст суміші з 1 кг сухого повітря та d грамів водяної пари, кДж/кг с.п.,

$$I = i_{\text{с.п.}} + di'' ,$$

де $i_{\text{с.п.}}$ – питома ентальпія сухого повітря, кДж/кг, i'' – питома ентальпія водяної пари, кДж/кг.

Температурою точки роси називається та температура t_p , при якій внаслідок охолодження вологого повітря при постійному вологовмісті d настає стан насичення ($\varphi = 1$), при цьому водяна пара конденсується і випадає у вигляді роси (або туману).

Температура за мокрим термометром t_m – це температура, яку мало би вологе повітря, якщо б його охолоджували при постійному тепловмісті (ентальпії) до насичення за рахунок випаровування в нього води. Цей параметр вимірюється експериментально. Для цього термодатчик, наприклад, балончик рідинного скляного термометра розширення покривається в один шар тонкою тканиною, другий кінець якої розміщується в ємності з водою. Завдяки капілярним силам вода тканиною буде безперервно подаватися до балончика термометра, забезпечуючи, таким чином, на його поверхні тонку плівку води.

З поверхні датчика мокрого термометра, що знаходиться в ненасиченому вологому повітрі, випаровується вода і пара, що утворюються, переноситься в повітря. Інтенсивність процесу випаровування пропорційна різниці $p_n - p_{\text{п}}$ (p_n – парціальний тиск водяної пари у вологій поверхні термодатчика в тонкому шарі над поверхнею рідини, що дорівнює тиску насичення для температури

рідини; p_p – парціальний тиск водяної пари в навколишньому вологому повітрі). У сухому повітрі p_p нижче і випаровування сильніше. У більш нагрітому повітрі p_p вище і випаровування також інтенсивніше.

Для процесу випаровування потрібно підведення теплоти пароутворення, джерелом якої в першу чергу є вода, що знаходиться на поверхні датчика температур. Відвід теплоти на випаровування призводить до зниження температури води, і поверхня датчика також знижує свою температуру до деякого значення t_m . Зниження температури води t_m нижче температури навколишнього повітря викликає процес підведення теплоти до рідини від повітря, пропорційне різниці температур $t - t_m$, що отримала назву **психрометричної різниці температур**. У результаті блокується подальше зниження температури, пов'язане з витратами теплоти на випаровування, оскільки настає динамічна рівновага між процесами випаровування води, що супроводжується зниженням температури шару води, та підведенням теплоти до води від навколишнього повітря з вищою температурою t . В ході розглянутого процесу тепло- та вологообміну ентальпія вологого повітря залишається незмінною, оскільки відведена від повітря теплова енергія (явна теплота) повертається назад у повітря у вигляді внутрішньої енергії водяної пари (прихована теплота). Отже, розглянутий процес випаровування умовно називають ізоентальпним.

Таким чином, у певний момент настає рівновага між приходом теплоти від повітря та витратою теплоти на випаровування вологи, в результаті температура мокрої поверхні термометра встановлюється на постійному значенні. Цю температуру нижчу, ніж температура сухого термометра, і реєструє мокрий термометр. Температура, що відповідає настанню рівноваги процесів тепло- та масообміну між вологим повітрям та мокрим термометром, називається температурою мокрого термометра.

Навчальне видання

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОГОГО ПОВІТРЯ

Методичні вказівки до лабораторної роботи
з курсу «Теплотехнічні вимірювання та прилади»
для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика»
усіх форм навчання

Укладачі: ПЕРЕСЬОЛКОВ Олександр Романович
КРУГЛЯКОВА Ольга Володимирівна

Відповідальний за випуск проф. Кунденко М.П.
Роботу до видання рекомендував доц. Тютюнник Л.І.

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 476

Формат 60x84 1/16.

Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,3

Видавничий центр НТУ «ХП».

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія