

ВАЛІДАЦІЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОНДЕНСАЦІЙНОГО ОСУШЕННЯ ПОВІТРЯ

Н. О. Прытула, кандидат технічних наук, доцент

А. М. Ляшенко, аспірант

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: prytula.natalia@lil.kpi.ua

Анотація. Представлено результати валідації лабораторного стенду припливно-рециркуляційної установки з механічним спонуканням повітря для дослідження процесу конденсаційного осушення повітря. Лабораторний стенд встановлений в Навчально-науковому інституті атомної та теплової енергетики КПІ імені Ігоря Сікорського. Лабораторна установка дозволяє досліджувати основні процеси обробки повітря: змішування, осушення, нагрівання та охолодження для систем опалення, вентиляції та кондиціонування як для житлово-комунального, так і промислового сектору. Лабораторна установка складається з секцій подачі зовнішнього повітря, рециркуляції повітря, вентилятора та фільтра, охолоджувача на базі теплового насоса типу повітря-повітря та електронагрівача. Автоматизована система моніторингу забезпечує контроль параметрів (витрати, тиску, температури та відносної вологості повітря) та точність досліджень, а розроблене програмне забезпечення дозволяє гнучке управління режимами роботи. У процесі дослідження було виконано вимірювання основних параметрів стенду та визначено похибку отриманих даних. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації енергоефективних режимів роботи систем ОВіК в режимі осушення, що сприятиме зниженню енергоспоживання та покращенню екологічності процесу, а також для подальших досліджень процесу конденсаційного осушення повітря.

Ключові слова: лабораторний стенд ОВіК; енергоефективність; осушення повітря; тепловий насос

Актуальність. Вологість та температура повітря є ключовим фактором в системах опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВіК), що впливає на комфорт і здоров'я людини, а також на стабільність роботи обладнання, ефективність протікання промислових процесів і фізико-хімічні властивості виготовлених матеріалів [1].

З розвитком технологій та ускладненням виробничих процесів попит на контроль вологості повітря як для житлово-комунального, так і промислового сектору значно зріс [2]. За оцінками [3], в Європейському Союзі на системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря ОВіК (Heating, ventilation, and air conditioning – HVAC) витрачається до 11 % загального споживання електроенергії. На виробничих об'єктах США витрати енергії на HVAC системи становлять 30–40 % від загальної кількості енергії. Таким чином, підвищення енергоефективності систем HVAC має важливе значення для енергозбереження.

Висока вологість у виробничих і складських приміщеннях спричиняє низку негативних наслідків, таких як зниження точності роботи приладів, корозія металевих конструкцій, псування лікарських засобів або харчових продуктів під час зберігання, конденсації вологи та утворення плісняви на поверхнях. Це призводить до погіршення якості продукції, руйнування трубопроводів, скорочення терміну експлуатації обладнання, підвищеного ризику коротких замикань у електричних системах і загального зниження надійності технологічних процесів. Також слід відмітити, що надмірна вологість має негативний вплив на фізичне та психоемоційне здоров'я працівників [4, 5].

Для забезпечення високої якості продукції та стабільної роботи обладнання виробничих, переробних і складських підприємств (автомобільні заводи, мікроелектроніка, текстильні та фармацевтичні фабрики, друкарні, підприємства харчової промисловості) потребують підтримання низької вологості в приміщеннях. Це є одним із ключових напрямів досліджень у сфері промислового кондиціонування повітря [6, 7].

У таких виробничих приміщеннях зазвичай спостерігається високий повітрообмін, що зумовлює значні енергетичні витрати на осушення повітря. Енергоспоживання систем кондиціонування повітря становить приблизно 30–40 % від загального енергоспоживання промислових будівель. При цьому осушення повітря значно збільшує потребу в охолодженні, зумовлюючи додаткове навантаження, яке може становити 30–50 % [8]. Тому навіть незначна економія енергоресурсів у процесі осушення повітря може істотно підвищити

енергоефективність і екологічність системи загалом, що робить такі рішення економічно доцільними [9].

Відтак, вибір ефективного методу осушення є критично важливим для оптимізації енергоспоживання в інженерних проєктах. Найбільш поширеною технологією є конденсаційне осушення повітря, в якій повітря охолоджується нижче точки роси, що забезпечує видалення надлишкової вологи. Такий підхід має низку переваг, зокрема просту конструкцію, а також можливість одночасного охолодження й осушення повітря, що робить її ефективним рішенням для застосування в житлово-комунальному і промисловому секторі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існують різні методи дослідження процесів підготовки повітря в системах опалення, вентиляції та кондиціонування, серед яких виділяють [10, 11]: експериментальні дослідження, математичне моделювання, а також розрахункові методи, що базуються на балансових рівняннях.

Як правило, для розробки ефективних контурів управління та підвищення продуктивності систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря необхідно мати точну модель установки [12]. Таку модель можна отримати шляхом якісно розробленої процедури ідентифікації. Зважаючи на те, що системи для підготовки та осушення повітря, а також процеси, що реалізуються в них загалом є складними об'єктами, їх моделювання може бути досить непростим завданням. Для спрощення цього процесу складну систему доцільно розділити на кілька підмоделей, кожна з яких описує певний аспект роботи [13].

Побудова відповідних моделей вимагає або глибокого розуміння фізичних процесів, що лежать в основі функціонування системи, або доступу до великого обсягу вимірних даних. Відповідно, існують три основні підходи до моделювання, які описані нижче [12, 13].

Модель на основі фізичних законів – базується на фундаментальних фізичних рівняннях, що описують поведінку системи. Вона добре піддається аналізу та має високу здатність до узагальнення, але може поступатися в точності через спрощені припущення.

Моделювання на основі даних – не потребує знання фізичних рівнянь, оскільки будується на основі емпіричних залежностей, що визначаються за вимірними вхідними та вихідними параметрами. Основна перевага цього підходу – висока точність у межах наявних даних, проте він характеризується низькою здатністю до узагальнення та меншою надійністю у відображенні фізичної поведінки системи.

Гібридний підхід – поєднує переваги двох попередніх методів, комбінуючи фізичні рівняння та статистичні методи обробки даних.

Оскільки в основі будь-якої математичної моделі лежить реальний фізичний експеримент, перед її побудовою необхідно розробити та змонтувати стенд, що містить ключові компоненти досліджуваної системи. Це дозволяє отримати необхідні експериментальні дані для подальшої ідентифікації параметрів та верифікації створеної моделі.

Таким чином, найбільшу достовірність результатів можна отримати при реальному фізичному дослідженні процесів на працюючій лабораторній установці. З цією метою в КПІ ім. Ігоря Сікорського було встановлено лабораторний стенд, що повністю повторює «блок підготовки та осушення повітря» [14, 15].

Мета дослідження – перевірка розроблених алгоритмів автоматичного керування та валідація встановленого вимірювального обладнання. Система повинна правильно працювати в різних режимах, враховуючи зміну параметрів внутрішнього і зовнішнього середовища. За відомими експериментальними даними необхідно для кожної групи на основі балансових розрахункових рівнянь оцінити адекватність отриманих результатів.

Матеріали та методи дослідження. Змонтована припливно-рециркуляційна установка з механічним спонуканням повітря (рис. 1) дозволяє:

- досліджувати процеси обробки повітря в припливно-рециркуляційних вентиляційних установках, в тому числі осушення повітря за рахунок охолодження його в фреоновому теплообміннику і догрівання до необхідних параметрів в електричному нагрівачі;
- експериментальне вивчення на практиці за допомогою системи моніторингу за температурними та вологісними показниками процесів обробки повітря

(охолодження, нагрів, змішування, осушення), які можуть бути змодельованими за допомогою hd-діаграми.



Рис. 1. Зовнішній вигляд стенду

Принципова схема установки зображена на рис. 2 з виділенням основних компонентів у групи. Вона складається з наступних 5 груп: секція забору зовнішнього повітря, секція рециркуляції, секція вентилятора з фільтром, секція охолодження/нагрівання з підключеним повітряним тепловим насосом та секція електричного нагрівача.

За допомогою установки можна тестувати та вимірювати різні режими зі змінною витратою повітря (використовуючи свіже та рециркуляційне повітря), зокрема: змішування, осушення, нагрівання та охолодження повітря з метою визначення оптимальних енергоефективних режимів роботи.

Регулювання кількості рециркуляційного повітря здійснюється за допомогою двох вентиляційних клапанів з електроприводами (позиції С1 та С2), які дозволяють незалежно регулювати витрату потоків зовнішнього та рециркуляційного повітря.

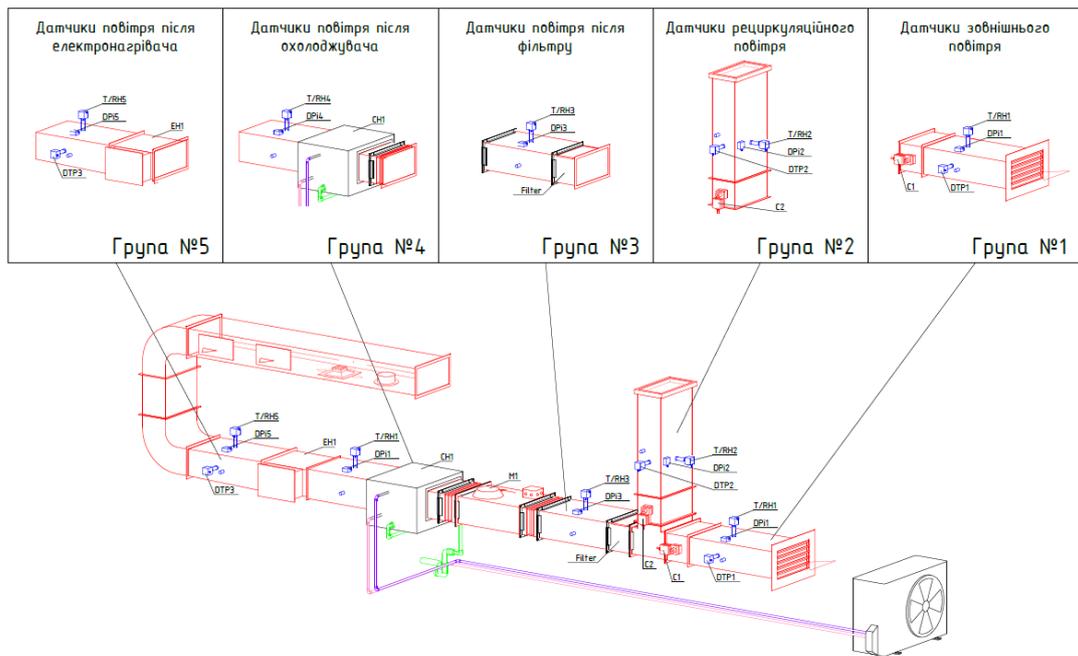


Рис. 2. Принципова схема припливно-рециркуляційної установки з механічним спонуканням повітря:

T/RH – датчик температури та вологості повітря; DPi – датчик перепаду тиску; DTP – датчик витрати повітря; С – привод засувки; СН – теплообмінник охолодження (осушення); М1 – припливний вентилятор

На повітропроводі після камери змішування встановлено касетний фільтр-бокс з фільтруючим елементом класу G4 (SFB 40-20) для грубого очищення повітря перед подачею до установки. Для зниження шуму і вібрації від каналного вентилятора (SV 40-20/22-1F-0,17 kW) – його підключення здійснене через гнучкі вставки [14].

Холодопостачання секції фреонового охолодження здійснюється від інвенторного компресорно-конденсаційного блоку з функцією теплового насоса LC AER-18-R32-OU (холодоагент R32). Фреонові магістралі передбачені з мідних труб необхідного діаметру і покриваються ізоляцією зі спіненого каучуку товщиною 9 мм з ПВХ покриттям. Для нагрівання повітря передбачено електричний повітрянагрівач ТЕНового типу SHE 40-20/6 [14].

Встановлені датчики дозволяють вимірювати температуру, вологість та витрату повітря для кожної групи. Монтаж датчиків передбачено в пряму ділянку повітропроводу довжиною 500 мм. Перелік всіх встановлених вимірювальних приладів наведено в таблиці 1.

1. Специфікація вимірювальних приладів, що використовуються в експерименті

Прилад	Параметр	Діапазон	Точність	Марка приладу
Зовнішній датчик температури та вологості	Температура повітря	-20–80 °C	±0.3 °C	BELIMO 220UTH-11
	Відносна вологість повітря	0–100 %	±2 %	
Датчики температури та вологості	Температура повітря	0–50 °C	±0.3 °C	BELIMO 220DTH-11M
	Відносна вологість повітря	0–100 %	±2 %	
Пресостат	Контроль роботи фільтру та вентилятора	30...500 Pa	±8 Pa	HK INSTRUMENT S PS500
Датчик диференційного тиску	Витрата повітря	0...2500	±10 Pa	DPT-2500-R8-D з FloXact-L400 з
Датчик диференційного тиску	Тиск	0...2500	≤500 Pa: ±5 Pa >500 Pa: ±10 Pa	BELIMO 22ADP-184
Мірний циліндр	Кількість сконденсованої вологи	0-500 мл	±5 мл	SIMAX 1634/BB/500

Підведення зовнішнього повітря відбувається з вулиці через зовнішню решітку. Забір рециркуляційного повітря відбувається з верхньої зони приміщення через повітропровід заглушений сіткою. Роздача припливного повітря в приміщенні здійснюється за допомогою внутрішніх решіток. У шафі керування встановлено частотний перетворювач для можливості плавного керування каналним вентилятором. Встановлена система моніторингу для збору та виводу на екран параметрів повітря та установки, вкладка «Показання» представлена на рис. 3.

Address	Name	Value	Um
16594	Група №1	<input type="text"/>	
8960	T/RH1 (Т) Датчик температури зовнішнього повітря	<input type="text"/>	°C
8963	T/RH1 (Н) Датчик вологості зовнішнього повітря	<input type="text"/>	%R.H.
8966	DPI1 Датчик перепаду тиску на зовнішній заслінці	<input type="text"/>	Pa
9036	DTP1 Витрата зовнішнього повітря	<input type="text"/>	m3/h
16594	Група №2	<input type="text"/>	
8972	T/RH2 (Т) Датчик температури рециркуляційного повітря	<input type="text"/>	°C
8975	T/RH2 (Н) Датчик вологості рециркуляційного повітря	<input type="text"/>	%R.H.
8978	DPI2 Датчик перепаду тиску на рециркуляційній заслінці	<input type="text"/>	Pa
9038	DTP2 Витрата рециркуляційного повітря	<input type="text"/>	m3/h
16594	Група №3	<input type="text"/>	
8984	T/RH3 (Т) Датчик температури після фільтра	<input type="text"/>	°C

Рис. 3. Вкладка відображення показників всіх датчиків

На цій вкладці (рис.3) відображаються показання всіх датчиків, згрупованих за функціональними категоріями. Кожна нова група розпочинається з заголовка «Група №...» та включає в себе наступні показники:

- витрата повітря, м³/год;
- тиск, Па;
- температура, °C;
- відносна вологість, %;
- ступінь забрудненості фільтру;
- ступінь відкриття повітряних клапанів.

Керування системою здійснюється з екрану комп'ютера за допомогою виконавчих механізмів, встановлених в шафі керування. Штатно в обладнанні передбачено можливість управління:

- каналним вентилятором у діапазоні від 25 до 100%;
- потужністю ТЕНового нагрівача у діапазоні 0...6 кВт;
- потужністю інвенторного компресорно-конденсаційного блоку номінальною потужністю охолодження 5 кВт;
- клапанами на камері змішування з можливістю регулювання відкриття від 0 до 100%.

Функціональна схема керування установки зображена на рис. 4.

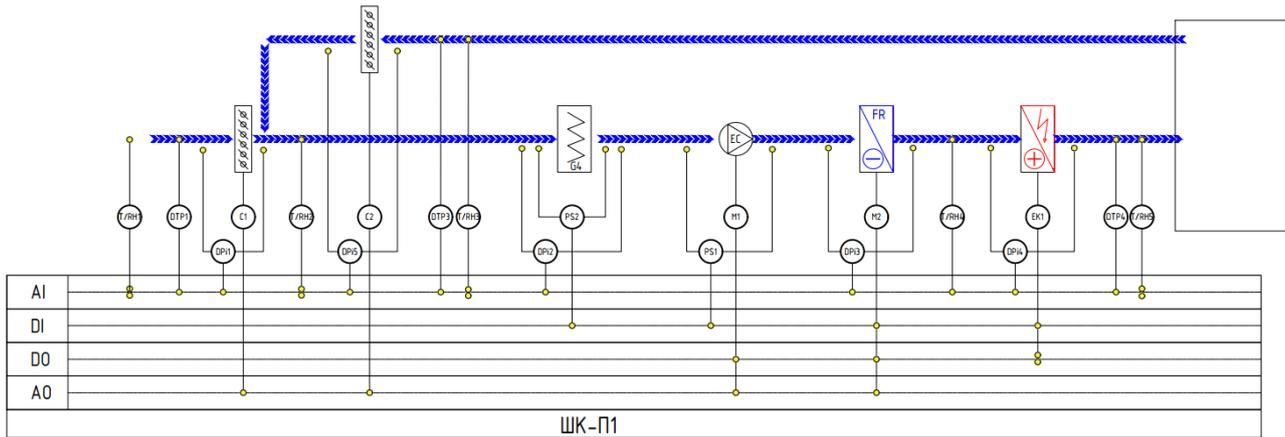


Рис. 4. Функціональна схема стенду:

T/RH – датчик температури та вологості повітря; DPi – датчик перепаду тиску; DTP – датчик витрати, M1 – припливний вентилятор; M2 – теплообмінник охолодження (випарник теплового насосу); EK1 – повітряний нагрівач; PS1 – пресостат контролю роботи припливного вентилятору; PS2 – реле контролю забруднення фільтру

Результати досліджень та їх обговорення. У процесі експериментального дослідження було виконано вимірювання для декількох випадків. Зображення одного вибраного характерного експериментального дослідження показані на h-d діаграмі (рис. 5).

Зовнішнє атмосферне повітря (точка 1) надходить в установку та змішується з рециркуляційним повітрям з приміщення (точка 2). Отримане після секції змішування повітря (точка 3) подається вентилятором на секцію охолодження, яка підключена до зовнішнього блоку теплового насосу. В результаті повітря охолоджується та осушується (точка 4), після чого догрівається в секції з ТЕНовим електронагрівачем до заданої температури (точка 5).

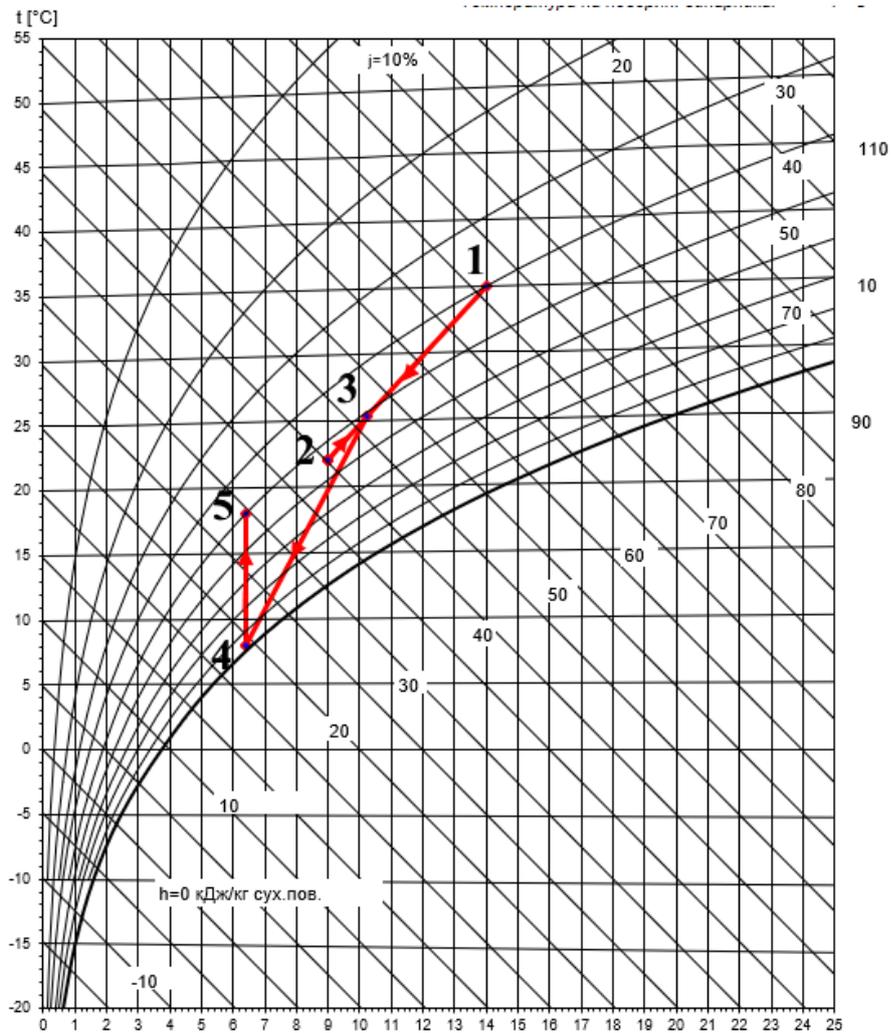


Рис. 5. Зображення експериментального дослідження на h-d діаграмі

Для розрахункового дослідження кожного окремого процесу використовувалися прості балансові рівняння.

1) У процесі змішування припливне повітря змішується з рециркуляційним повітря з приміщення, тепловий баланс визначається за рівнянням:

$$m_3 h_3 = m_1 h_1 + m_2 h_2, \quad (1)$$

де m_1 , m_2 , m_3 – витрата зовнішнього, рециркуляційного та підготовленого повітря, кг/с;

h_1 , h_2 , h_3 – ентальпія зовнішнього, рециркуляційного та підготовленого повітря, кДж/кг.

2) У процесі охолодження кількість теплоти, що відводиться від повітря до фреонового контуру, визначається за рівнянням:

$$Q_{\text{охл}} = m_3(h_3 - h_4), \quad (2)$$

де h_3 і h_4 – ентальпія повітря на вході та виході з охолоджувача, кДж/кг.

З іншого боку, відома потужність охолодження теплового насосу $Q_{\text{ТН}}$.

3) Кількість сконденсованої вологи визначається з рівняння

$$G_{\text{конд}} = m_3(d_3 - d_4), \quad (3)$$

де d_3 і d_4 – вологовміст повітря на вході та виході з охолоджувача, кг_{пари}/кг_{сух.пов.}.

З іншого боку, було виконане пряме вимірювання конденсованої вологи об'ємним методом V , мл.

4) У процесі нагрівання кількість теплоти, що передається від ТЕНа до повітря, визначається рівнянням:

$$Q_{\text{н}} = m_3(h_5 - h_4), \quad (4)$$

де h_4 і h_5 – ентальпія на вході та виході з нагрівача, кДж/кг.

З іншого боку, потужність ТЕНового нагрівача плавно регулюється $N_{\text{тен}}$ від 0 до 6 кВт.

2. Похибка балансів процесів підготовки повітря

№	Процес підготовки повітря	Величини, що порівнюються		Похибка балансу
1	Змішування	$m_3 h_3$	$m_1 h_1 + m_2 h_2$	< 6%
2	Охолодження	$Q_{\text{охл}}$	$Q_{\text{ТН}}$	
3	Осушення	$G_{\text{конд}}$	V	
4	Нагрів	$Q_{\text{н}}$	$N_{\text{тен}}$	

Визначення похибок вимірювання та визначення розрахункових величин. Для оцінки похибки результату отриманого за допомогою балансових рівнянь приймається, що результат розрахунку є заданою функцією незалежних змінних $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ [16], тобто

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n). \quad (5)$$

При цьому вважається, що всі невизначеності (похибки вимірюваних величин) мають однакову вірогідність [16]. Тоді, якщо похибку розрахункового результату позначити як w_R , а відповідно похибки вимірюваних величин незалежних змінних w_1, w_2, \dots, w_n [14], тоді

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

Як приклад визначимо похибку для розрахункової формули для обчислення теплової потужності, що відводиться від повітря в процесі охолодження 3-4 за формулою (2).

Похибка для визначення ентальпії повітря за програмою CoolProp $h = f(t, \varphi, P)$ з використанням похибок приладів з таблиці 1 не перевищує $\pm 2,5\%$ [17].

У розрахунковій формулі є три величини, які впливають на результат:

$$Q_{\text{охл}} = f(m_3, h_3, h_4).$$

Таким чином, номінальна теплота, сприйнята рідиною:

$$Q_{\text{охл}} = 0,09(52 - 19) = 2,97 \text{ кВт.}$$

Знайдемо похідні відповідних функцій:

$$\frac{\partial Q_{\text{охл}}}{\partial m_3} = h_3 - h_4, \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{охл}}}{\partial h_3} = m_3, \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_{\text{охл}}}{\partial h_4} = -m_3. \quad (9)$$

Невизначеність для теплової потужності тепер записується як:

$$w_Q = \left[(h_3 - h_4)^2 w_{m_3}^2 + (m_3)^2 w_{h_3}^2 + (m_3)^2 w_{h_4}^2 \right]^{1/2}. \quad (10)$$

Підставляючи відповідні значення, отримуємо:

$$w_Q = \left[(52 - 19)^2 \cdot 0,001^2 + 0,09^2 \cdot 1,3^2 + 0,09^2 \cdot 0,5^2 \right]^{1/2} = 0,13 \text{ кВт.}$$

Що еквівалентно:

$$\frac{w_Q}{Q_{\text{охл}}} = \frac{0,13}{2,97} = 0,044 = 4,4\%.$$

Аналогічним чином визначені решта розрахункових параметрів, які представлені в таблиці 3.

3. Максимальна похибка визначення розрахункових величин

Розрахункова величина	Розрахункова формула	Максимальна похибка визначення, %
Вологовміст	CoolProp	2,5
Ентальпія	CoolProp	2,5
Теплота нагрівання/ охолодження	$Q = m_3(h_{\text{вх}} - h_{\text{вих}})$	4,4
Кількість сконденсованої рідини	Пряме вимірювання	1
	$G_{\text{конд}} = m_3(d_3 - d_4)$	4,4

Висновки і перспективи.

Впровадження передових технологій, правильний вибір і експлуатація систем опалення, вентиляції та кондиціонування може забезпечити зниження енергоспоживання та одночасне досягнення задовільного рівня комфорту для людей та необхідних параметрів для промисловості. У КПІ ім. Ігоря Сікорського змонтований стенд припливно-рециркуляційної установки з механічним спонуканням повітря, який дозволяє досліджувати основні процеси обробки волого повітря: змішування, нагрівання, охолодження, осушення. У процесі пуско-налагоджувальних робіт було перевірено працездатність всіх встановлених приладів та систем. Виконані балансові розрахунки показали похибку, що не перевищує 6 %. Розраховано похибки вимірювання основних величин, що дозволяють проводити подальші дослідження процесу осушення на змонтованому стенді.

Таким чином, встановлений експериментальний стенд дозволяє адекватно досліджувати різноманітні процеси підготовки повітря для систем ОВіК. У майбутніх публікаціях буде досліджено особливості реалізації процесу осушення повітря для різних початкових параметрів. Це дозволить запропонувати методи

оптимізації, спрямовані на підвищення ефективності осушення та зменшення споживання енергії в промислових умовах з низькою вологістю.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [Чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2013. 240 с.
2. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>
3. Qun Chen, Jim R. Jones, Richard H. Archer A dehumidification process with cascading desiccant wheels to produce air with dew point below 0 °C Applied Thermal Engineering 148 (2019) 78-86. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.114>
4. Qunli Zhang, Yanxin Li, Qiuyue Zhang, Fengge Ma, Xiaoshu Lü Application of deep dehumidification technology in low-humidity industry: A review / Renewable and Sustainable Energy Reviews 193 (2024) 114278 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114278>
5. Xing Su, Yining Geng, Lei Huang, Shangao Li, Qinbao Wang, Zehan Xu, Shaochen Tian Review on dehumidification technology in low and extremely low humidity industrial environments Energy 302 (2024) 131793 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131793>
6. Yin H, Yin Y. Current status and development trend of dehumidification technology in low-humidity industries. 2022. DOI 10.1088/1755-1315/1011/1/012030
7. Climatronics. Humidity control in food industry. DEC.28, 2020. <https://www.climatronics.in/humidity-control-in-food-industry/>
8. Galitsky C, Galitsky C, Worrell E. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the vehicle assembly industry: an energy star guide for energy and plant managers. 2008. United States. DOI:10.2172/927881
9. Woods J, et al. Humidity's impact on greenhouse gas emissions from air conditioning. Joule 2022;6(4):726-41. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.013>
10. Степаненко В.А., Веремійчук Ю.А. Інтегрована система енергозабезпечення із застосуванням вентиляційних систем / Енергетика: економіка, технології, екологія. 2020. № 4. С. 70-77. ISSN 2308-7382 (Online)
11. Безродний М.К., Притула Н.О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, Вид. "Політехніка", 2023. 528 с.
12. Afroz, Z.; Shafiullah, G.; Urme, T.; Higgins, G. Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. 2018, 83, 64-84.
13. Maher Ala'raj, Mohammed Radi, Maysam F. Abbod, Munir Majdalawieh, Mariana Parodi Data-driven based HVAC optimisation approaches: A Systematic Literature Review Journal of Building Engineering Volume 46, 1 April 2022, 103678. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103678>
14. <https://aerostar.ua/ua>
15. <https://profinstall.com.ua/>

16. Holman, J. P. (Jack Philip) Experimental methods for engineers / J.P. Holman. – 8th ed. p. см. – (McGraw-Hill series in mechanical engineering) ISBN-13: 978-0-07-352930-1
17. <http://www.coolprop.org/>

References

1. DBN B.2.5-67:2013. Heating, ventilation and air conditioning. [Valid from 2014-01-01]. Official edition. Kyiv, 2013, 240.
2. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling (2020). Available at: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>.
3. Qun Chen, Jim R. Jones, Richard H. Archer A dehumidification process with cascading desiccant wheels to produce air with dew point below 0 °C (2019). Applied Thermal Engineering, 148, 78-86. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.114>.
4. Qunli Zhang, Yanxin Li, Qiuyue Zhang, Fengge Ma, Xiaoshu Lü (2024). Application of deep dehumidification technology in low-humidity industry: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 193, 114278 Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114278>
5. Xing Su, Yining Geng, Lei Huang, Shangao Li, Qinbao Wang, Zehan Xu, Shaochen Tian (2024). Review on dehumidification technology in low and extremely low humidity industrial environments Energy, 302, 131793. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131793>
6. Yin H, Yin Y. (2022). Current status and development trend of dehumidification technology in low-humidity industries. DOI 10.1088/1755-1315/1011/1/012030
7. Climatronics (2020). Humidity control in food industry. DEC.28, 2020. Available at: <https://www.climatronics.in/humidity-control-in-food-industry/>
8. Galitsky C, Galitsky C, Worrell E. (2008), Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the vehicle assembly industry: an energy star guide for energy and plant managers. United States. DOI:10.2172/927881
9. Woods J, et al (2022). Humidity's impact on greenhouse gas emissions from air conditioning. Joule 2022;6(4):726-41. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.013>
10. V. Stepanenko, Y. Veremiichuk (2020). Integrated energy supply system with the use of ventilation systems. Energy: economics, technology, ecology, 4, 70-77. ISSN 2308-7382.
11. Bezrodny M. K., Prytula N. O. (2023), Energy efficiency of heat pump heating, ventilation and air conditioning schemes. Kyiv: National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", "Polytechnic", 528.
12. Afroz, Z.; Shafiullah, G.; Urme, T.; Higgins, G. (2018). Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. Renew. Sustain. Energy Rev., 83, 64-84.
13. Maher Ala'raj, Mohammed Radi, Maysam F. Abbod, Munir Majdalawieh, Marianela Parodi (2022). Data-driven based HVAC optimisation approaches: A

Systematic Literature Review Journal of Building Engineering, 46 (1), April 2022, 103678. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103678>

14. Available at: <https://aerostar.ua/ua>

15. Available at: <https://proinstall.com.ua/>

16. Holman, J. P. (Jack Philip) Experimental methods for engineers. 8th ed. p. cm. McGraw-Hill series in mechanical engineering). ISBN-13: 978-0-07-352930-1

17. Available at: <http://www.coolprop.org/>

VALIDATION OF A LABORATORY BENCH FOR RESEARCHING THE PROCESS OF CONDENSATION AIR DRYING

N. Prytula, A. Lyashenko

Abstract. *The paper presents the results of the validation of a laboratory stand for a recirculation air conditions unit for studying the process of condensation drying. The laboratory stand is installed at the Educational and Research Institute of Atomic and Thermal Power Engineering of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.*

The laboratory setup enables the study of key air treatment processes, including mixing, dehumidification, heating, and cooling, for Heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems in both residential and industrial sectors. It consists of sections for external air supply, air recirculation, a fan and filter, a cooler based on a heat pump, and an electric heater.

An automated monitoring system ensures control over parameters such as airflow rate, pressure, temperature, and relative humidity, providing high research accuracy. The developed software allows for flexible operation mode control. The evaluation of the control system's efficiency demonstrated that the modelling corresponds to real processes with an acceptable error of 6%, confirming the high accuracy of the experimental data.

The obtained results can be used for further optimization of energy-efficient HVAC system operation modes, contributing to reduced energy consumption and improved environmental sustainability of buildings and industrial facilities, as well as for further research into the process of condensation air drying.

Key words: *HVAC laboratory stand; energy efficiency; air dehumidification; heat pump*