

УДК 697.93

**Чабан І. В., асистент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

### **АНАЛІЗ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПАКТНОГО УДАРНО-ПІННОГО АПАРАТУ З БЛОКОМ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ**

**В статті розглянуто термодинамічний аналіз режиму роботи компактного ударно-пінного апарату з блоком термоелектричних модулів. Визначено величини потоків ексєргії та ексєрґетичних втрат при обробці повітря в апараті. Здійснено порівняння апарату з існуючими компактними кондиціонерами за показником ексєрґетичного ККД.**

**Ключові слова:** ударно-пінний апарат, ексєргія, ексєрґетичний ККД, втрати ексєргії, споживча потужність.

**Основною умовою** оптимального зберігання музейних фондів є дотримання нормативного та максимально стабільного режиму температури та вологості повітря в усіх приміщеннях будівлі музею.

На сьогодні існує широкий спектр систем забезпечення мікроклімату у залах експозицій. Проте стабільність мікрокліматичних параметрів повинна забезпечуватись не тільки при експозиції, але й при передачі експонатів на тимчасове зберігання до інших музеїв, а також для забезпечення і підтримання оптимальних умов у спеціальних музейних приміщеннях, таких як, приміщення для витримування предметів після обробки, ізоляторах, дезкамерах, приміщеннях дезінфекції, дезінсекції [1]. На сьогодні відсутні компактні апарати, які могли б забезпечити оптимальні температурні та вологісні параметри повітряного середовища в невеликих об'ємах. Тому нами був розроблений та досліджений енергоефективний, автономний, компактний ударно-пінний апарат для тепловологісної обробки повітря відповідно до специфіки кожного з приміщень [2, 3].

Техніко-економічний аналіз апаратів для обробки повітря, без визначення втрат енергії в окремих його елементах є поверхневим. Для об'єктивної оцінки ефективності таких апаратів необхідно враховувати термодинамічну ефективність як всього комплексу в сукупності, так і окремих його вузлів.

**Останнім часом широке** поширення отримав ексєрґетичний метод

визначення термодинамічної досконалості процесів, що протікають в різних енергетичних установках, в тому числі в системах і апаратах кондиціонування повітря [4–7]. Даний метод досліджувався в роботах Р. К. Клаузіуса, Дж. В. Гіббса, Ж. Гюї, А. Стодоли, Я. Шаргута, В. Й. Лабая.

Особливістю компактного ударно-пінного апарату є підтримання оптимальних параметрів повітря в невеликому, обмеженому, замкненому просторі. Схема конструкції апарату наведена на рис. 1.

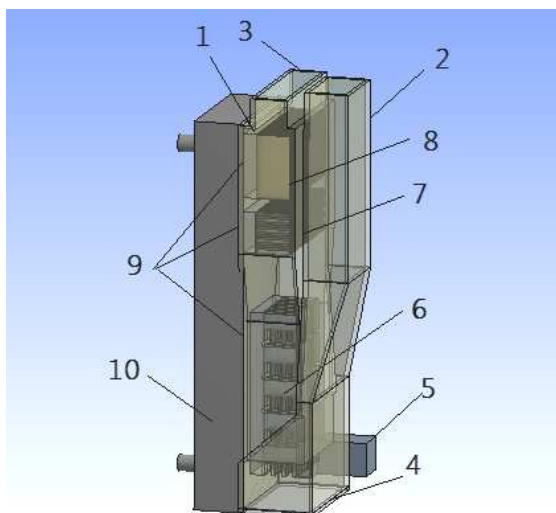


Рис. 1. Конструкція комбінованого ударно-пінного апарату з блоком термоелектричних модулів:

- 1 – корпус; 2 – канал для подачі повітря; 3 – випускний отвір; 4 – піддон;  
5 – регулятор рівня води; 6 – теплообмінник з функцією стабілізації пінного шару; 7 – теплообмінник з функцією сепарації краплин вологи; 8 – теплообмінник; 9 – термоелектричний модуль; 10 – канал допоміжного потоку

Апарат працює наступним чином: повітря вентилятором через патрубков для подачі повітря 2 подається на поверхню рідини, яка заповнює піддон 4 апарату, витіснена рідина інтенсивно перемішується з повітрям, внаслідок чого, утворюється рухомий шар піни, який омиває пластини теплообмінника 6. Потім повітря проходить крізь теплообмінник, який виконує функцію сепаратора 7, де відділяються краплини вологи. Повітря, позбавлене краплин вологи, проходить через теплоо-

бмінник 9 де доводиться до необхідних параметрів і видаляється через випускний отвір 3. В якості джерела тепла і холоду в апараті використанні термоелектричні модулі 9.

Розміщення у пінному шарі теплообмінника 6 у вигляді основи з паралельно прикріпленими пластинами в нижній частині з п-подібними пазами, забезпечують турбулізацію пінного шару та рівномірне омивання теплообмінної поверхні, що сприяє підвищенню інтенсивності та глибини процесів теплової та вологісної обробки повітря в пінному шарі при незначному збільшенні споживчої потужності.

**Обробка повітря** в компактному ударно-пінному апараті з термоелектричними модулями супроводжується високими втратами тиску, тому доцільним є аналіз ефективності роботи даного апарату та його порівняння з існуючими компактними кондиціонерами.

Розглянемо роботу апарату коли вологовміст внутрішнього повітря в приміщення менший за вологовміст зовнішнього повітря  $d_v < d_c$ , і температура внутрішнього повітря нижча за температуру зовнішнього повітря  $t_v < t_c$ .

В дослідженнях прийнята номінальна продуктивність досліджуваного апарату  $120 \text{ м}^3/\text{год}$ . Робота апарату здійснюється в режимі рециркуляції з підмішуванням зовнішнього повітря в об'ємі 10% від загального об'єму повітря, що проходить обробку. Початкові параметри повітря змінюються в межах  $t_c=28-35 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_c=12-24,1 \text{ г/кг}$ , барометричний тиск  $P_b=99,9 \text{ кПа}$ , параметри внутрішнього повітря  $t_p=18-23 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $d_p=7,1-11,3 \text{ г/кг}$ .

На рис. 2 наведена послідовність змін, які відбуваються з вологим повітрям, що проходить через елементи компактного ударно-пінного апарату.

Побудова на I-d діаграмі виконана згідно загально прийнятої методики [8]. Параметри повітря у характерних точках процесу рис. 2 встановлюються за відомими аналітичними залежностями для вологого повітря та за розрахунковою математичною моделлю для компактного ударно-пінного апарату [9].

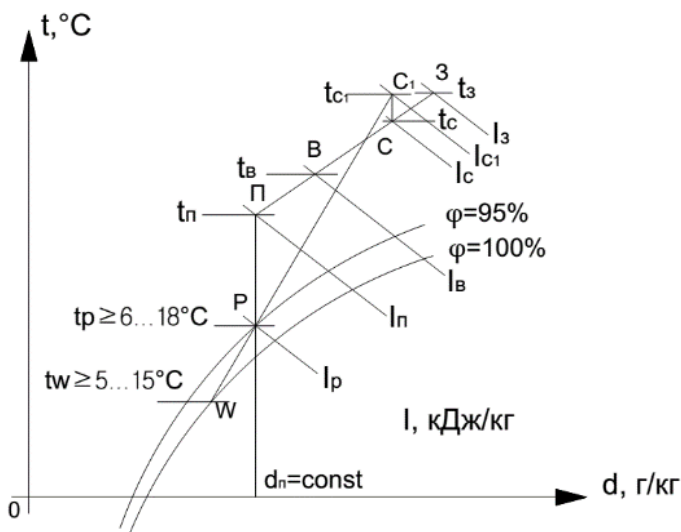


Рис. 2. Зображення процесів зміни стану вологого повітря в компактному ударно-пінному апараті з блоком термоелектричних модулів на I–D діаграмі:  $C_1P$  – процес охолодження з осушенням повітря у реактивному просторі апарату;  $КП_1$  – процес нагрівання повітря у повітрянагрівнику;  $CC_1$  – підігрівання повітря на 1–1,5 °С у вентиляторі та канали для подачі повітря;  $ПВ$  – процес асиміляції тепло- та вологонадлишків в приміщенні;  $ВСЗ$  – процес змішування потоків повітря, що видається з приміщення та зовнішнього;  $C$  – точка суміші

Для оцінки досконалості протікання процесів в компактному ударно-пінному апараті з блоком термоелектричних модулів, застосовано поняття ексергетичного ККД, який визначається, як відношення корисної ексергії, тобто ексергії відведеної від повітря  $\Delta E_{вих}$  та ексергії, яка затрачалась на здійснення процесу,  $\Delta E_{вх}$  [4–6]:

$$\eta_e = \frac{\Delta E_{вих}}{\Delta E_{вх}}. \quad (1)$$

В якості параметрів, що характеризують стан рівноваги системи з навколишнім середовищем, приймають параметри повітря на вході в комбінований ударно-пінний апарат: повітря в приміщенні, якщо апарат працює в режимі повної рециркуляції або суміші свіжого та рециркуляційного повітря, якщо відбувається змішування потоків [7]. В нашо-

му випадку приймають параметри суміші свіжого та рециркуляційного повітря.

Корисний ефект визначається змінами ексергії охолодженого та осушеного повітря в компактному ударно-пінному апараті [4]:

$$\Delta E_{\text{вих}} = G_n (e_1 - e_2) \cdot 0,278, \quad (2)$$

де  $G_n$  – витрата повітря, що проходить через апарат,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $e$  – питома ексергія повітря що проходить теплову та вологісну обробку,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ; індекси 1 та 2 характеризують початкові та кінцеві параметри повітря на відповідних етапах обробки;  $0,278$  – коефіцієнт переведення одиниць.

Питома ексергія,  $\text{кДж}/\text{кг}$  у характерній точці процесу рівна сумі фізичної  $e_\phi$  і хімічної  $e_x$  ексергії, які визначаються за наступними формулами:

$$e_\phi = (\bar{c}_{s.\text{нов.}} + \bar{c}_n \cdot d) \cdot (T - T_o - T_o \cdot \ln \frac{T}{T_o}), \quad (3)$$

$$e_x = T_o (R_{s.\text{нов.}} + R_n \cdot d) \cdot \ln \frac{622 + d_o}{622 + d} + R_n \cdot d \cdot \ln \frac{d}{d_o}, \quad (4)$$

де  $C_{s.\text{нов.}}$ ,  $C_n$  – середня питома теплоємність сухого повітря і водяної пари, приймаються  $1,005$  і  $1,86$   $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$  відповідно;  $T_o$ ,  $T$  – відповідно, абсолютна температура навколишнього середовища і повітря у відповідній точці процесу,  $\text{К}$ ;  $R_{s.\text{нов.}}$ ,  $R_n$  – газова стала сухого повітря і водяної пари;  $d_o$ ,  $d$  – вологовміст навколишнього середовища і повітря у певних точках,  $\text{кг}/\text{кг}$ .

Результати розрахунків питомої ексергії волого повітря у відповідних точках процесів, що характеризують роботу компактного ударно-пінного апарату з блоком термоелектричних модулів, при температурі суміші зовнішнього і внутрішнього повітря  $28$   $^\circ\text{C}$ , температурі води в пінному шарі  $12$   $^\circ\text{C}$ , наведені в таблиці 1.

Аналізуючи дані таблиці можемо зробити висновок, що найбільша питома ексергія, спостерігається при проходженні повітря через теплообмінник з П-подібними пазами, що розміщений в пінному шарі. Про те на даному етапі відбуваються найбільші втрати тиску потоком на проходження повітря через шар піни.

Таблиця 1

Параметри точок, що характеризують стан вологого повітря підчас роботи компактного ударно-пінного апарату

Точки, стану повітря на I-D діаграмі	Температура $t$ , °C	Питома ентальпія $I$ , кДж/кг	Вологовміст, $d$ , г/кг	Відносна вологість $\varphi$ , %	Питома ексергія $e$ , кДж/кг
С	27	58,3	12,6	60	0
С1	28	56,4	12,6	56,4	0,0017
Р	13	35,4	8,9	95	1,1318
П	20	42,7	8,9	61	0,1122

Втрати ексергії, пов'язані з втратою аеродинамічного тиску потоку повітря, що залежить від висоти пінного шару та швидкості повітряного потоку в перерізі апарату, були враховані через споживчу потужність двигуна вентиляційного агрегату. Підведена ексергія для охолодження води в пінному шарі та на нагрів теплообмінника підігріву були враховані через потужність, термоелектричних модулів.

По результатах стендових випробувань експериментального зразка компактного ударно-пінного апарату рис. 1, за вище наведеними розрахунковими рівняннями визначено значення ексергії, відведеної від повітря, що проходить теплову і вологісну обробку в апараті.

В таблицю 2. зведені значення ексергії відведеної від повітря, при його тепловій та вологісній обробці в апараті, споживчу потужність, що затрачалась на здійснення процесів та ексергетичного ККД компактного ударно-пінного апарату залежно від початкових параметрів повітряного потоку та параметрів води в пінному шарі. Данні наведені для швидкості повітряного потоку в перерізі апарату 3 м/с, статичному рівні рідини 20 мм, по відношенню до нижнього зрізу каналу для подачі повітря та висоті пінного шару 120 мм.

На основі отриманих результатів виведена аналітична залежність ексергетичного ККД апарату від трьох незалежних факторів – початкової температури та вологості повітря та температури води в пінному шарі, максимальна похибка апроксимації склала 3,5%.

$$\eta_e = -36,91 - 0,02 \cdot t_e + 1,31 \cdot t_c + 0,23 \cdot \varphi, \quad (5)$$

де  $t_e$  – температура води в пінному шарі, °C;  $t_c$  – температура суміші зовнішнього та внутрішнього повітря, температура на вході в апарат, °C;  $\varphi$  – відносна вологість повітря на вході в апарат, %.

Таблиця 2

Значення  $\eta_e$  при обробці в компактному ударно-пінному апараті, при різних початкових параметрах повітря та води в пінному шарі

$t_6, \text{ }^\circ\text{C}$	Параметри повітря								$E, \text{ Вт}$	$N, \text{ кВт}$	$\eta_e, \text{ \%}$
	На вході в апарат				На виході з апарату						
	$t_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_0, \text{ кДж/кг}$	$d_0, \text{ г/кг}$	$\varphi_0, \text{ \%}$	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$I_1, \text{ кДж/кг}$	$d_1, \text{ г/кг}$	$\varphi_1, \text{ \%}$			
9	28	68,2	15,7	60	18	36,1	7,1	55	1,4	0,42	11,9
9	31	71,5	15,8	50	19	37,6	7,3	53	1,6	0,4	13,7
9	35	95,4	24,1	70	22	43,5	8,4	50	2,5	0,45	27,9
12	35	90,9	21,7	60	22	45,7	9,3	55	1,3	0,34	20,6
12	28	57,8	12	50	21	55,4	8,7	55	1,32	0,35	13,7
12	31	82,9	20,2	70	22	49	9	54	1,69	0,32	17,7
15	35	81,4	18	50	23	51,8	11,3	64	1,2	0,25	19,3
15	28	71,3	16,9	70	22	48,5	10,4	62	0,98	0,27	14,9
15	31	75,3	17,3	60	23	59,6	10,6	60	1,24	0,27	18,9

Графічна інтерпретація даного рівняння наведена на рис. 3 для температури води в пінному шарі  $9^\circ\text{C}$ , та тиску повітря  $99,9 \text{ кПа}$ .

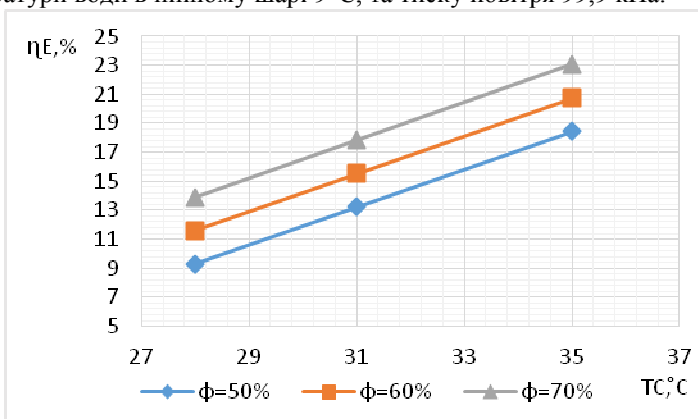


Рис. 3. Залежність ексергетичного ККД компактного ударно-пінного апарату від початкової параметрів повітря, що проходить температурну та вологісну обробку

Характер зміни даних кривих відповідає зміні холодопродуктивності апарату. Зростання ексергетичного ККД відбувається при збільшенні температури та відносної вологості повітря на вході в апарат та зниженні температури води в пінному шарі.

Приведена методика аналізу дає можливість порівняти кондиціонери за ексергетичним ККД. При температурі повітря 35 °С і його відносній вологості 50%, ексергетичний ККД транспортного кондиціонера КТГ–С рівний 10,2% [6], серійного транспортного кондиціонера КТА–05С–01А – 8,7% [6], автомобільного кондиціонера 11,2% [10] досліджуваного компактного ударно-пінного апарату 19,3%.

**Висновки.** В результаті аналізу було виявлено, що зростання ексергетичного ККД компактного ударно-пінного апарату відбувається при збільшенні температури та відносної вологості повітря на вході в апарат та зниженні температури води в пінному шарі.

Ексергетичний аналіз показав, що інтенсивність процесів теплової і вологісної обробки повітря в реактивному просторі компактного ударно-пінного апарату є вищою по відношенню до споживчої потужності апарату на 42%, порівняно з іншими компактними кондиціонерами.

Підвищення значення ККД пояснюється конструктивними та гідродинамічними особливостями апарату, що забезпечують підвищення інтенсивності та глибини процесів теплової та вологісної обробки повітря в пінному шарі при незначному збільшенні споживчої потужності.

1. Технические нормативы / Рекомендации по проектированию музеев/ – М. : Стройиздат, 1988. 2. Пат. № 101290 України МПК F24F 3/ Пристрій для тепловологісної обробки повітря / Довгалюк В. Б., Шадуря І. В. заяв. 12.06.12, опубл. 11.03.13, Бюл. № 5/2013. 3. Пат. №106579 України МПК F24F 3/ Пристрій для тепловологісної обробки повітря / Довгалюк В. Б., Чабан І. В. заяв. 26.12.13, опубл. 10.06.14, Бюл. № 17/2014. 4. Бродянский В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. – М. : Энергия, 1973. – 296 с. 5. Лабай В. Й. Дослідження ексергетичної ефективності систем кондиціонування повітря чистих приміщень / В. Й. Лабай, Д. І. Гарасим // Холодильна техніка та технологія – 2014. – № 4: Холодильні та супутні технології. – С. 47–55. 6. Набиулин Ф. А. Анализ термодинамической эффективности кондиционеров воздуха / Ф. А. Набиулин, И. Д. Квят // Холодильная техника – 1989. – № 7. – С. 26–30. 7. Шаргут Я. Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М. : Энергия, 1968. – 280 с. 8. Богословский В. Н. Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов / В. Н. Богословский, О. Я. Кокорин, Л. В. Петров. – Стройиздат, 1985. – 367 с. 9. Чабан І. В. Математичне моделювання процесів в ударно-пінному апараті з блоком термоелектричних модулів / І. В. Чабан // Вісник НУВГП. Зб.наук.праць. – Вип. 2 (61). Технічні науки – С. 50–62.



10. Иванов О. П. Эффективные аппараты воздушного охлаждения для малых холодильных машин и транспортных кондиционеров / О. П. Иванов, В. В. Федяшов // Холодильная техника – 1984. – № 8. – С. 26–32.

Рецензент: к.т.н., доцент Тимейчук О. Ю. (НУВГП, м. Рівне)

---

**Chaban I. V., Assistant** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

### **THERMODYNAMIC EFFICIENCY DETERMINATION OF COMBINED SHOCK-FOAM-TYPE AIR-HANDLING UNIT WITH BLOCK OF THERMOELECTRIC MODULES**

**The paper deals with thermodynamic analysis of combined shock-foam-type air-handling unit with block of thermoelectric modules operation. Defined exergy fluxes and losses during processing in air-handling unit. Comparison of shock-foam-type air-handling unit and automobile air conditioner by exergic efficiency were made.**

**Keywords: shock-foam-type air-handling unit, exergy, exergic efficiency, exergy losses, power consumption.**

---

**Чабан І. В., асистент** (Національний університет водного господарства та природопользования, г. Ровно)

### **АНАЛИЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПАКТНОГО УДАРНО-ПЕННОГО АППАРАТА С БЛОКОМ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ**

**В статье рассмотрен термодинамический анализ режима работы компактного ударно-пенного аппарата с блоком термоэлектрических модулей. Определены величины потоков эксэргии и эксергетических потерь при обработке воздуха в аппарате. Проведено сравнение аппарата с существующими автомобильными кондиционерами по показателю экзегетического КПД.**

**Ключевые слова: ударно-пенный аппарат, эксэргия, экзегетический КПД, потери эксэргии, потребляемая мощность.**

---