

УДК 621.311

**М. М. Чепурний, к. т. н., доц.; Н. В. Резидент, к. т. н., доц.; Т. М. Олексина;
Ю. К. Возіян**

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ ІЗ КОТЛІВ В УТИЛІЗАТО- РАХ КОНТАКТНОГО ТИПУ

Проаналізовано закономірності зміни інтенсивності утилізації теплоти відхідних газів із котлів за рахунок «сухого» і конденсаційного теплообміну в контактних утилізаторах. Отримано зручні формули для обчислення теплової потужності утилізації. Визначено економію газу за рахунок утилізації в деяких парових і водогрійних котлах. Відповідно до цієї економії оцінено зменшення шкідливих викидів у атмосферу.

Ключові слова: відхідні гази, контактний утилізатор, температура точки роси, паровий котел, водогрійний котел.

Постановка завдання

Через складність поставок природного газу та підвищення його вартості стратегічним завданням є економія цього виду палива. Одним із пріоритетних засобів економії природного газу є використання низькотемпературної скидної теплоти продуктів згорання в паливовикористальних установках, зокрема в парових і водогрійних котлах.

Енергетичні рівні теплових відходів від промислових і опалювальних котлів, за експертними оцінками, складають майже 45% загального обсягу паливно-енергетичних ресурсів [1]. В обласних і районних центрах України працюють багаточисельні промислові та водогрійні котельні, обладнані котлами невеликої потужності, робочим паливом у яких є природний газ. Такі котли, зазвичай, не мають розвинутих хвостових поверхонь нагріву і характеризуються відносно високою температурою відхідних газів ($t_{гз} > 130$ °С).

Продукти згорання природного газу містять високу концентрацію водяної пари, на утворення котрої витрачена певна частка теплоти згорання палива. За допомогою утилізаторів теплоти контактного типу (контактних утилізаторів) температуру відхідних газів із котлів можна зменшити до температури, яка менша за температуру точки роси t_R , тобто $t_{гз} < t_R$. Це дає змогу використовувати як фізичний (сухий), так і конденсаційний (вологісний) складники теплоти відхідних газів.

Утилізовану теплоту відхідних газів, як правило, використовують зовні котла в певному елементі теплової схеми котельні, наприклад, для підігріву сирової або хімічищеної води. Завдяки теплоті, утилізованій у контактному утилізаторі, зменшується витрата теплоти на власні потреби котла. Відповідно до цього зменшується теплова продуктивність котла, що зумовлює зменшення витрати робочого палива в котлі. Унаслідок цього досягають певної економії палива. Зменшення витрати палива зумовлює певне зменшення шкідливих викидів у атмосферу, а також зменшення витрат електроенергії на привід тягодутьових установок.

Зважаючи на вищевикладене, були поставлені завдання: визначити загальні закономірності утилізаційних складників теплоти утилізації відхідних газів; оцінити ефективність використання утилізованої теплоти в котлах різного типу.

Основні результати

Роботу котла в номінальних режимах характеризують майже незмінні значення коефіцієнтів надлишку повітря в топці та у вихідних газах, температур відхідних газів і холодного (у приміщенні) повітря, а також теплові втрати від хімічної неповноти згорання палива q_3 і в навколишнє середовище q_5 . Найбільша теплова втрата з відхідними газами q_2 , як відомо

[2 – 5], залежить від температур відхідних газів і холодного повітря, коефіцієнта надлишку повітря у відхідних газах. Замість складних обчислень питомих об'ємів продуктів згорання палива та їх ентальпій, необхідних для визначення q_2 за нормативним методом [4], використовують більш спрощені формули [2, 3]. На підставі даних про склад і властивості природних газів різних родовищ із теплою згорання на суху масу 31 – 37,9 МДж/м³ [4, 6] отримана узагальнена формула для обчислення q_2 %, яка з точністю $\pm 0,14\%$ узгоджується зі значеннями q_2 , обчисленими за нормативним методом [4]:

$$q_2 = [(0,0343 \cdot \alpha_{\text{вг}} + 0,00782) t_{\text{вг}} - \exp(0,4324 \cdot \alpha_{\text{вг}} - 0,3746)] \theta^{0,33}, \quad (1)$$

де $\alpha_{\text{вг}}$ – коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах; $\theta = [293 / (t_{\text{хн}} + 375)]$; $t_{\text{хн}}$ – температура холодного повітря.

Для спрощення розрахунків на рис. 1 наведені залежності $q_2 = f(\alpha_{\text{вг}}, t_{\text{вг}})$ для $\theta = 1$

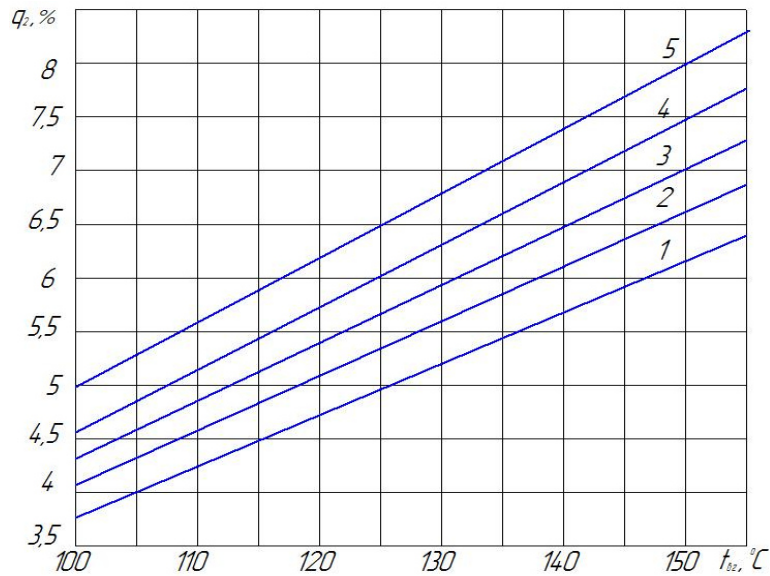


Рис. 1. Значення q_2 : 1- $\alpha_{\text{вг}}=1$; 2-1,3; 3-1,4; 4-1,5; 5-1,6

Для заданої теплової потужності котла Q_k витрата робочого палива дорівнює, м³/с

$$V_p = Q_k / (Q_n^c \cdot \eta_k), \quad (2)$$

де Q_n^c – теплота згорання природного газу на суху масу, МДж/м³; η_k – коефіцієнт корисної дії (ККД) котла.

Теплову потужність, яка утилізується в контактному утилізаторі за рахунок «сухого» теплообміну, обчислюють за формулою, МВт [7].

$$Q_c = Q_{\text{нал}} (1 - \eta_k) \psi_c, \quad (3)$$

де $Q_{\text{нал}} = V_p \cdot Q_n^c$ – теплова потужність спаленого палива; $\psi_c = (t_{\text{вг}} - t_{\text{кв}}) / t_{\text{вг}}$ – коефіцієнт утилізації теплоти за рахунок «сухого» теплообміну; $t_{\text{кв}}$ – температура димових газів на виході з контактного утилізатора.

Закономірності зміни коефіцієнта утилізації ψ_c показані на рис. 2.

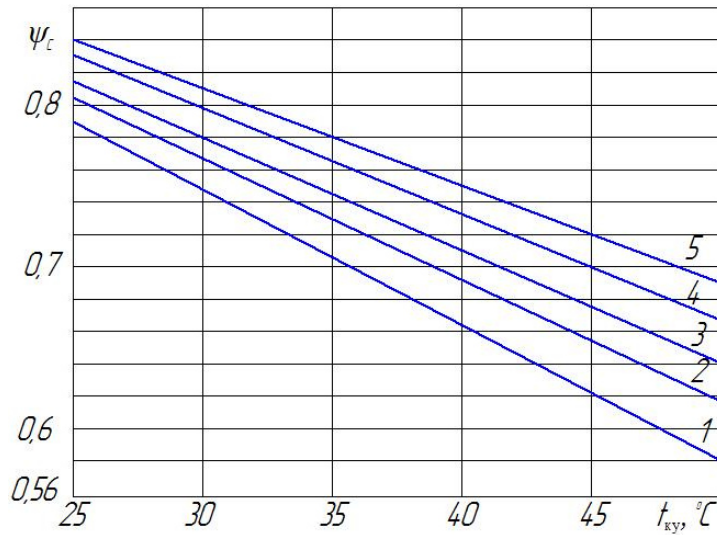


Рис. 2. Значення коефіцієнта утилізації теплоти за рахунок «сухого» теплообміну: 1- $t_{02}=120^{\circ}\text{C}$; 2-130; 3-140; 4-150; 5-160

Із рис. 2 видно, що інтенсивність «сухого» теплообміну лінійно зменшується зі зменшенням температури відхідних газів і температури газів за контактним утилізатором (зі зменшенням ступеня охолодження газів) у контактному утилізаторі.

Залежності, наведені на рис. 2, апроксимуються формулою

$$\psi_c = 1 - (0,6143 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot t_{02}) \cdot t_{ky} \quad (4)$$

На рис. 3 наведені розрахункові значення питомої утилізаційної потужності q_c за рахунок «сухого» теплообміну в контактному утилізаторі для $Q_{нал}=1$ МВт.

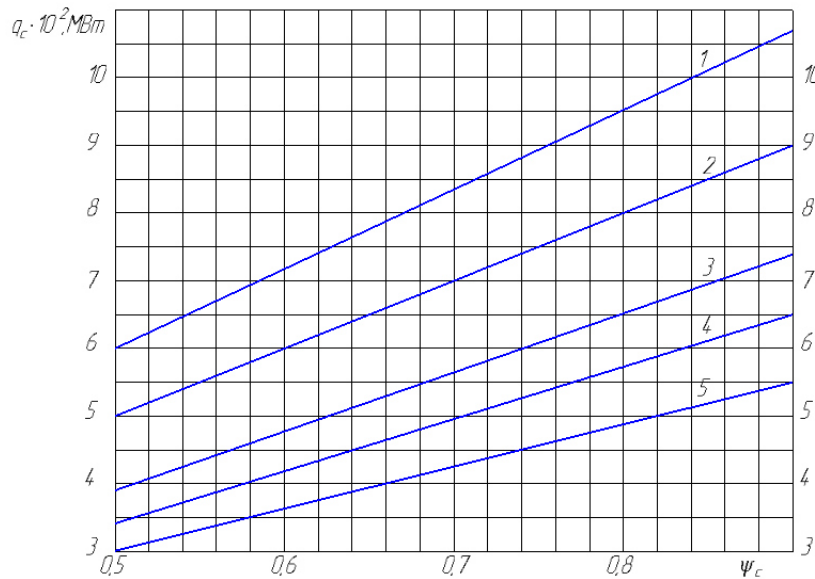


Рис. 3. Залежності $q_c = f(\psi_c, \eta_c)$ для «сухого» теплообміну: 1- $\eta_c=0,88$; 2-0,9; 3-0,92; 4-0,94; 5-0,96

Утилізаційна потужність за рахунок «сухого» теплообміну лінійно зростає зі збільшенням коефіцієнта утилізації ψ_c і зменшенням ККД котла.

Теплова потужність, яка утилізується в контактному утилізаторі за рахунок конденсації водяної пари із продуктів згорання палива, складає

$$Q_{кн} = B_p(Q_c^e - Q_c^n) \psi_{кн} = B_p \cdot Q_c^n(Q_c^e / Q_c^n - 1) \psi_{кн} = Q_{нал}(Q^* - 1) \psi_{кн}, \quad (5)$$

де Q_c^c – вища теплота згорання робочого палива, яка перевищує нижчу теплоту згорання на теплоту конденсації водяної пари; $\psi_{кн} = (t_R - t_{кн}) / t_R$ – конденсаційний коефіцієнт утилізації теплоти; $Q^* = Q_c^c / Q_{н.}^c$.

Температура точки роси t_R може бути визначена за [10, 17] °С.

$$t_R = 117,5 \cdot \alpha_{в2}^{-0,155} - 57,09. \quad (6)$$

Відношення Q^* для газоподібних палив, за даними [10, 11], складає 1,111 – 1,1124. У контактних утилізаторах температура точки роси збільшується за рахунок збільшення об'ємної частки водяної пари у відхідних газах. Крім того, підвищення вологовмісту дозволяє отримати додатковий ефект у вигляді зменшення викидів оксидів азоту в атмосферу [10, 17].

Розрахункові значення коефіцієнтів утилізації теплоти за рахунок конденсації водяної пари наведені на рис. 4.

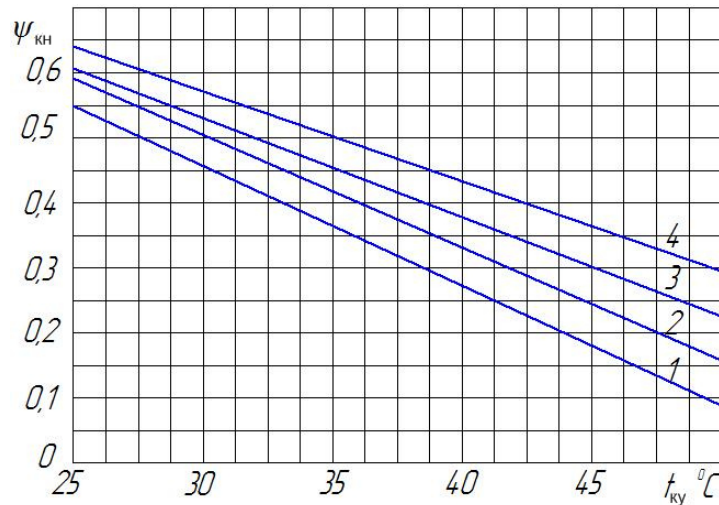


Рис. 4. Закономірності зміни коефіцієнтів конденсаційного складника утилізації теплоти у відхідних газах:
1- $t_R = 55^\circ\text{C}$; 2-60; 3-65; 4-70

Із рис. 4 видно, що характер зміни коефіцієнтів $\psi_{кн}$ аналогічний до характеру змін коефіцієнтів ψ_c , наведених на рис. 2. Основний вплив на інтенсивність теплообміну за рахунок конденсації водяної пари, так само як і на рис. 2, справляє температура газів за контактним утилізатором, зі збільшенням якої значення $\psi_{кн}$ зменшується, а зі збільшенням температури точки роси інтенсивність конденсаційного складника теплообміну зростає.

Залежності на рис. 4 апроксимуються співвідношенням

$$\psi_{кн} = 1 - (0,02656 - 1,554 \cdot 10^{-4} \cdot t_R) t_{кн}. \quad (7)$$

Нескладно побачити, що формула (7) за структурою аналогічна до формули (4), але для однакового інтервалу зміни температур газів за контактним утилізатором значення коефіцієнтів ψ_c перевищують значення $\psi_{кн}$.

На рис. 5 наведені розрахункові значення питомої потужності конденсаційного складника теплообміну у відхідних газах $q_{кн}$ для $Q_{нал} = 1\text{МВт}$.

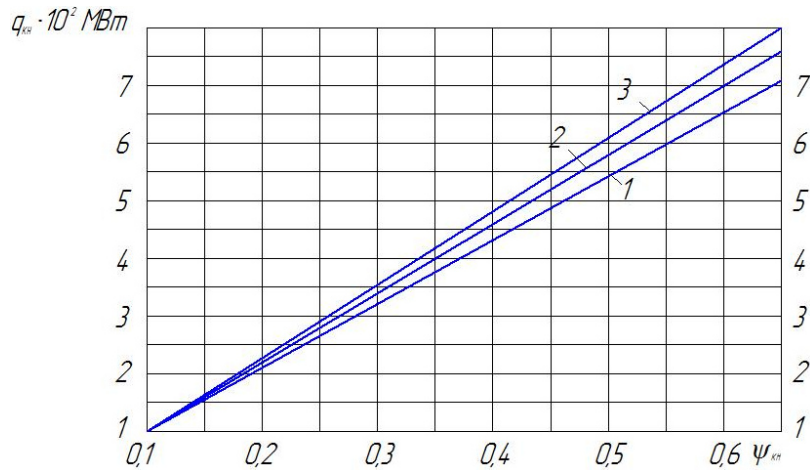


Рис. 5. Залежності зміни питомої потужності за рахунок конденсаційного теплообміну у відхідних газах: 1- $Q^*=1,111$; 2- $1,118$; 3- $1,124$

Утилізаційна потужність за рахунок конденсаційного теплообміну у відхідних газах зростає із підвищенням коефіцієнтів утилізації $\psi_{кн}$ і Q^* . Більш суттєве розшарування значень $q_{кн}$ спостерігають за $\psi_{кн} > 0,25$. За абсолютними величинами значення $q_{кн}$ менше за значення q_c .

Сумарна величина потужності, яка утилізується в контактному утилізаторі, дорівнюватиме

$$Q_{ку} = B_p \cdot Q_n^c (q_c + q_{кн}) = Q_{нал} (q_c + q_{кн}). \quad (8)$$

Потужність утилізації, яка використовується в певному теплообмінному апараті теплової схеми котельні, складатиме

$$Q_{ум} = Q_{ку} \cdot \eta_{то}, \quad (9)$$

де $\eta_{то}$ – ККД теплообмінника.

У разі використання теплової потужності $Q_{ум}$, теплова потужність котла має зменшитись на цю величину й дорівнюватиме

$$Q'_к = Q_к - Q_{ум}. \quad (10)$$

Якщо знехтувати незначною змiною втрати теплоти в навколишнє середовище в котлі, економія робочого палива складе:

$$\Delta B_p = Q_{ум} / (Q_n^c \cdot \eta_к). \quad (11)$$

Як зазначалось раніше, зменшення витрати палива в котлі зумовлює зменшення електричної потужності на приводи тягодутьових установок (вентилятора і димососа), а також зменшення шкідливих викидів у атмосферу.

Отже, отримані прості та зручні для інженерної практики формули для обчислення повної потужності утилізації та економії палива в разі застосування утилізації теплоти відхідних газів у контактних утилізаторах. На підставі отриманих результатів для прикладу обчислені показники роботи деяких парових і водогрійних котлів з утилізацією теплоти відхідних газів. У розрахунках температура точки роси і температура газів за контактним утилізатором складає 56°C і 40°C відповідно. Коефіцієнт надлишку повітря у відхідних газах в усіх котлах вибраний 1,28. Паливо-природний газ, теплота згорання якого на суху масу $33,4 \text{ МДж/м}^3$, а теоретичні об'єми повітря і продуктів згорання складають $9,52$ і $10,62 \text{ м}^3/\text{м}^3$ відповідно. Відношення вищої теплоти згорання до нижчої вибрано таким, що дорівнює 1,112. Для визначення температури відхідних газів і теплових втрат q_3 і q_5 використовували літературні

джерела [5, 6, 12], а також режимні карти котлів, які працюють на промислових і опалювальних котельнях м. Вінниці. Напір і ККД тягодутьових установок складає: 3,2 кПа і 0,7 для вентилятора і 2,5; 0,65 для димососа, ККД теплообмінника дорівнює 0,98. Річний термін роботи складає 7800 год. Розрахунки теплових схем котельень викладені в [13]. Викиди шкідливих речовин в атмосферу визначали за ГДК 34.02.305.-2002 "Викиди забруднюючих речовин в атмосферу від енергетичних установок". Тип котлів і показники їх роботи зведені в таблицю.

Показники роботи котлів з утилізацією теплоти відхідних газів

Показники	Тип котла			
	ДКВР-20-13-250	БГ-35	КОЛВІ 10000	ПТВМ-90
Теплова потужність котла, МВт	14,02	26,25	10	34,86
Температура відхідних газів, °С	150	130	145	155
Втрати теплоти з відхідними газами, %	7,02	5,92	6,71	7,27
Втрати теплоти в навколишнє середовище, %	1,3	1,1	1,55	0,95
Втрати теплоти від хімічного недопалу, %	0,03	0,022	0,025	0,02
Коефіцієнт корисної дії	0,9165	0,9295	0,9171	0,9176
Витрата робочого палива, м ³ /с	0,4580	0,8455	0,3264	1,1374
Теплова потужність спаленого палива, МВт	15,297	28,2397	10,9017	37,9891
Коефіцієнт утилізації для «сухого» теплообміну	0,7333	0,692	0,724	0,7419
Питома потужність «сухого» теплообміну, МВт	0,0612	0,04878	0,0600	0,06113
Коефіцієнт утилізації конденсаційного теплообміну	0,3103	0,3103	0,3103	0,3103
Питома потужність конденсаційного теплообміну, МВт	0,0372	0,0372	0,0372	0,0372
Потужність, утилізована в контактному утилізаторі, МВт	1,505	2,428	1,0596	3,735
Економія робочого палива: м ³ /с %	0,04818	0,0782	0,0339	0,1194
	10,5	9,25	10,386	13,01
Річна економія робочого палива, тис·м ³	1352,89	2195,85	951,91	3352,75
Зменшення потужностей приводів тягодутьових установок, кВт	6,28	9,72	4,48	12,25
Річна економія електроенергії, МВт·год	48,984	75,816	34,944	95,55
Річне зменшення шкідливих викидів в атмосферу, тонн: оксид вуглецю оксидів азоту парникового газу (CO ₂)				
	8,935	14,720	6,291	21,727
	264,14	414,53	185,99	664,54
	1805,74	2923,34	1273,23	4432,89

Наведені результати свідчать про доцільність застосування утилізації відхідних газів від парових і водогрійних котлів, які працюють на газоподібному паливі. У результаті утилізації досягають економії робочого палива, зменшення витрат електроенергії на власні потреби котельної установки та зменшення забруднювальних викидів в атмосферу. Ефективність утилізації може бути підвищена за рахунок збільшення температури точки роси. Якщо в котельні працює не один, а два або більше котлів, то витрати за паливо, електроенергію та шкідливі викиди можуть бути суттєво зменшені. Залежно від потужності два або більше котлів можуть працювати на єдину утилізаційну установку, що значно скорочує термін її окупності [9, 14, 15, 16].

Отримані результати є необхідною передумовою для вибору типу конденсаційних утилізаційних установок. Наукові праці ВНТУ, 2015, № 4

торів та експрес-оцінки ефективності застосування утилізації відхідних газів із котлів.

Висновки

1. Отримані зручні для інженерної практики формули для визначення втрат теплоти з відхідними газами в котлах, коефіцієнтів, що характеризують інтенсивність утилізації теплоти за рахунок «сухого» і конденсаційного теплообміну.

2. Виявлено, що основними чинниками інтенсивності утилізації теплоти відхідних газів є температура відхідних газів, температура газів за контактним економайзером і температура точки роси.

3. Установлено, що в процесі утилізації теплоти відхідних газів від котлів можна досягти економії робочого палива в межах 9,25 – 13%, а також зменшення витрат електроенергії на власні потреби та зменшення шкідливих викидів в атмосферу.

4. Результати досліджень можуть бути використані для вибору типу контактного утилізатора та оцінки ефективності застосування утилізації теплоти вихідних газів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ефимов А. В. Система глубокой утилизации теплоты газов, уходящих из котельных агрегатов / А. В. Ефимов; А. Л. Гончаренко, Л. В. Гончаренко // Вісник НТУ "ХПІ". – 2013. – № 13. – С. 73 – 80.
2. Равич М. В. Эффективность использования топлива / М. Б. Равич. – М. : Наука, 1977. – 344 с.
3. Данилов Е. А. Контроль сжигания топлива в промышленных котельных установках / Е. А. Данилов, В. Н. Клочков. – К. : Техніка, 1988. – 166 с.
4. Тепловой расчет котлов (нормативный метод) / [под ред. Г. М. Кагана]. – СПб : Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
5. Чепурний М. М. Теплові розрахунки парогенераторів / М. М. Чепурний, Д. В. Степанов, Є. С. Корженко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 154 с.
6. Теплотехнический справочник / [под ред. В. Н. Юренева, П. Д. Лебедева]. – Т. 1. – М.: Энергия, 1975. – 744 с.
7. Клименко В. Н. Некоторые особенности применения пароконденсационных тепловых насосов для утилизации сбросной теплоты отопительных котлов / В. Н. Клименко // Промышленная теплотехника. – 2011. – Т. 33. – № 5. – С. 43 – 48.
8. Бакластов А. М. Проектирования монтаж и эксплуатация теплоиспользующих установок / А. М. Бакластов. – М. : Энергия, 1970. – 568 с.
9. Чепурний М. М. Розрахунки тепломасообмінних апаратів / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 130 с.
10. Семенюк Л. Г. Получение конденсата при глубоком охлаждении продуктов сгорания / Л. Г. Семенюк // Промышленная энергетика, 1987. – № 8. – С. 47 – 50.
11. Жовмір М. М. Утилізація низькотемпературної теплоти продуктів згорання палива за допомогою теплових насосів / М. М. Жовмір // Промышленная теплотехника, 2008. – Т. 30. – № 2. – С. 90 – 97.
12. Гольстрем В. А. Справочник энергетика промышленных предприятий / В. А. Гольстрем, А. С. Иваненко. – К. : Техніка, 1982. – 561 с.
13. Ткаченко С. Й. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання / С. Й. Ткаченко, М. М. Чепурний, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 137 с.
14. Таубман Е. И. Контактные теплообменники / Е. И. Таубман, В. А. Корнев, В. А. Мельтцев. – М. : Химия, 1987. – 256 с.
15. Гершуни А. Н. Разработка и внедрение эффективных утилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа / А. Н. Гершуни, В. П. Нищик // Промышленная теплотехника, 1977. – Т. 19. – № 3. – С. 69 – 73.
16. Баскаков А. П. Основные факторы, определяющие эффективность глубокого охлаждения продуктов сгорания в газифицированных котельных / А. П. Баскаков, Е. В. Ильина // Промышленная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 46 – 49.
17. Аронов И. З. Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа / И. З. Аронов. – Л. : Недра, 1990. – 280 с.

Чепурний Марко Миколайович – к. т. н., доцент, професор кафедри теплоенергетики.

Резидент Наталія Володимирівна – к. т. н., доцент кафедри теплоенергетики.

Олексина Тетяна Михайлівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання.

Возіян Юлія Костянтинівна – студентка інституту будівництва, теплоенергетики та газопостачання. Вінницький національний технічний університет.