

## **ЕКОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОГРІЙНОГО КОТЛА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ТВЕРДОМУ ПАЛИВІ**

### **Вступ. Постановка задачі.**

В Україні спостерігається стійкий дефіцит енергоносіїв, тому економічно доцільним є використання місцевих видів палива (деревини, торфу, органічних відходів), а також традиційного енергоносія–вугілля.

Всі процеси, пов'язані з виробництвом, транспортуванням, зберіганням і спалюванням органічних видів палива в котельних установках різної потужності, є джерелами забруднюючих речовин. Шкідливий вплив від яких може проявлятися на різних рівнях: локальному, регіональному, глобальному.

Одними із найважливіших вимог, що ставляться до промислових і опалювальних котлів є дотримання норм по допустимих викидах в атмосферу токсичних викидів оксидів азоту ( $\text{NO}_x$ ), монооксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) [1-3].

Захист атмосфери від шкідливих викидів опалювальних котелень є однією з найважливіших задач. Необхідність скорочення шкідливих викидів з продуктами згорання викликана також тим, що котельні, обладнані малими котлами розташовані в жилих зонах.

В сучасній науковій літературі вкрай обмаль інформації по дослідженню екологічних характеристик водогрійних котлів малої потужності в умовах реальної експлуатації, що є надзвичайно **актуальним** на сьогоднішній день.

Вчені з інституту технічної теплофізики НАН України [4] провели цикл досліджень по спалюванню торфу і його сумішей з деревиною в печах різної конфігурації та проаналізували фактори, які тим чи іншим чином впливають на ефективність процесу спалювання.

Російськими вченими в роботі [5] наведені експериментальні дані, що характеризують реальний спектр шкідливих викидів в атмосферу для типових теплогерел малої потужності, що працюють на вугіллі та деревині. Показано, що більшість з них працюють з завищеними екологічними показниками.

**Метою** даної роботи є дослідження екологічних характеристик водогрійного котла Buderus Funke Logica потужністю 70 кВт в процесі разового завантаження палива.

### Експериментальне забезпечення

Дослідження показників роботи водогрійного котла, що працює на вугіллі та деревині було проведено на котельні підприємства "Нічлава" (м. Вінниця). В котельні встановлено водогрійний котел фірми Buderus Logano номінальною потужністю 70 кВт. Схема експериментальної установки наведена на рис.1.

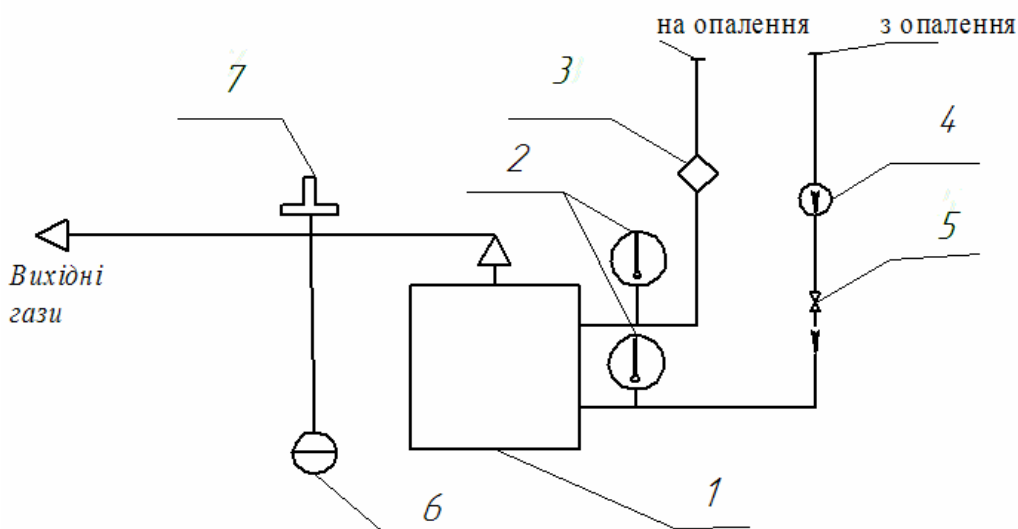


Рис.1– Схема експериментальної установки: 1-котел; 2– термометри; 3 – тепловий лічильник; 4- насос системи опалення; 5-кран; 6-газоаналізатор; 7- пробовідбірник продуктів згорання.

Дослідження проводились для разового завантаження палива масою 100 кг. В процесі досліджень вимірювались такі величини: за допомогою

газоаналізатора: вміст в димових газах кисню  $O_2$ , %; оксиду вуглецю  $CO$ , ppm; двоокису сірки  $SO_2$ , ppm; оксидів азоту  $NO_x$ , ppm; коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ ; температура відхідних газів  $t_{в.г.}$ , °C; ККД котла; інші показники котла: температура води на вході та виході з котла, °C; витрата води, м<sup>3</sup>/год; потужність котла, кВт; тривалість експерименту, хв. Всі згадані вище показники вимірювались через фіксовані проміжки часу.

Екологічні показники котла вимірювались за допомогою газоаналізатора марки ОКСИ-5М.

### **Дослідження показників роботи котла на деревині**

На початку досліджень в котел були завантажені брикети з деревини вологістю  $W^p=12\%$  і теплотою згорання  $Q_u^p=16$  МДж/кг (дані заводу виробника) масою 100 кг. По мірі вигорання палива фіксувались основні показники котла.

В таблиці 1 наведені показники роботи котла на деревині.

Слід зазначити, що у доступній нам науковій літературі відсутні дослідження роботи котлів на твердому паливі з фіксацією основних показників на протязі повного циклу вигорання.

Через 30 хвилин від початку роботи котел вийшов на свою номінальну потужність (68,9 кВт). Як бачимо з таблиці 1 максимальні значення викидів шкідливих речовин спостерігаються на перших етапах досліджень, коли паливо розгоряється, процес горіння ще не стабільний, поверхні нагріву холодні. На початку експерименту газоаналізатор зафіксував також незначний вміст в продуктах згорання оксидів сірки. Ймовірно, в брикетах трапились частинки кори деревини, де сірка може бути в незначній кількості.

На останніх етапах експерименту викиди шкідливих речовин знижуються. Ймовірно, деяке збільшення коефіцієнту надлишку повітря при зниженні навантаження виявило більший вплив на утворення  $NO_x$ , ніж зниження температури в топці. Зниження викидів  $CO$  наприкінці експерименту пов'язане із зменшенням кількості вуглецю палива.

Слід зауважити, що викиди CO на протязі горіння палива коливались мало, що пов'язано з оптимальною організацією горіння, яка полягає в розділенні повітряних потоків: частина повітря подається під колосникову решітку, інша частина через отвори в бокових стінках топкової камери. Тобто можна сказати, що в процесі згорання палива мала місце газогенерація.

Слід зазначити, що в даному експерименті вентилятор був вимкнений, тобто повітря в зону горіння надходило за рахунок самотяги. На останніх етапах дослідів, коли шар палива і його аеродинамічний опір зменшились, тяга підсилалась, і коефіцієнт надлишку повітря сягнув  $\alpha=8\dots 19$ . Цей факт не вплинув на коливання викидів CO, але концентрація NO<sub>x</sub> в димових газах зменшилась в 4 рази.

### **Дослідження показників роботи котла на вугіллі**

В експериментальних дослідженнях використовувався антрацит з таким складом: W<sup>p</sup>=4,5%; A<sup>p</sup>=9,8%; S<sup>p</sup>=1,99%; C<sup>p</sup>=79,9%; H<sup>p</sup>=1,6; N<sup>p</sup>=0,8; O<sup>p</sup>=1,4%; Q<sub>n</sub><sup>p</sup> = 28,67 МДж/кг (дані постачальника).

Як бачимо з таблиці 2, тривалість горіння вугілля значно більша, ніж деревини (при однаковій початковій вазі 100 кг), при різниці в ціні палива майже 2 рази. Отже, вугілля необхідно завантажувати в котел рідше, що досить зручно в процесі обслуговування котла.

Викиди оксидів азоту та сірки для котлів малої потужності українським ГОСТом [1] не нормуються, але реальні показники шкідливих викидів (табл. 2) близькі до норм, наведених в [2].

Викиди NO обумовлені максимальною температурою горіння і концентрацією азоту і кисню в зоні реагування. Оптимальна система подачі повітря призводить до згладжування температурного максимуму в топці, і в свою чергу, до незначних екологічних викидів NO<sub>x</sub>.

Таблиця 1.–Результати дослідження роботи котла на деревині.

Назва величини	Позначення	Розмірність	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кисень	O <sub>2</sub>	%	8,3	7,8	7,5	7,6	7,9	7	6,5	9	7,2	10,8	12,2	14,4
Оксид вуглецю	CO	ppm	3141	2800	2751	2782	2730	2752	2637	2573	2515	2253	2709	2387
Двоокис сірки	SO <sub>2</sub>	ppm	9	12	10	13	13	1	0	0	0	0	0	0
Оксид азоту	NO	ppm	28	46	22	34	45	0	6	9	3	25	20	14
Двоокис азоту	NO <sub>2</sub>	ppm	2	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0
ККД	η	%	78	85	86,3	88	87,8	85	87,5	88,1	87,3	62,9	65,1	65
Температура відхідних газів	t <sub>r</sub>	°C	235	172	164	144	145	182	161	140	165	350	286	247
Коефіцієнт надлишку повітря	α		1,65	1,59	1,55	1,56	1,6	1,5	1,44	1,75	1,52	2,05	2,56	3,18
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	%	7,1	7,4	7,6	7,5	7,3	7,8	8,1	6,7	7,7	5,7	4,6	3,7
Оксид азоту	NO <sub>x</sub>	ppm	30	47	22	34	45	1	7	10	3	25	20	14
Температура води на виході з котла	t <sub>1</sub>	°C	90	88,4	85,1	90,3	84,4	95,7	97,2	85,7	97,1	88,1	82,6	83
Температура води на вході в котел	t <sub>2</sub>	°C	66	66,5	66,3	63,8	61,7	61,7	61,1	67,9	72,5	61,1	61,3	61,1
Різниця температур	Δt	°C	24	21,94	18,8	26,54	22,65	33,95	36,12	16,33	24,6	26,98	22,51	21,94
Витрата води	V	м <sup>3</sup> /год	2,53	2,5	2,51	2,52	2,53	2,56	2,586	2,58	2,61	2,567	2,572	2,55
Потужність котла	Q	кВт	68,9	62,4	53,1	72,3	64,1	97,4	104,2	47,6	71,5	79,2	65,5	63,3
Час (від початку експерименту)	τ	хв.	30	40	45	55	70	75	90	95	105	115	130	145

Продовження таблиці 1.

Назва величини	Позначення	Розмірність	13	14	15	16	17	18	19	20
Кисень	O <sub>2</sub>	%	16,2	17	17,3	18,1	18,9	19,4	19,7	19,9
Оксид вуглецю	CO	ppm	2408	2428	2402	2414	2709	2323	1850	1555
Двоокис сірки	SO <sub>2</sub>	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0
Оксид азоту	NO	ppm	10	8	6	6	6	3	3	2
Двоокис азоту	NO <sub>2</sub>	ppm	0	0	0	0	0	0	0	0
ККД	η	%	61,3	57,7	59,8	58,3	-	-	-	-
Температура відхідних газів	t <sub>r</sub>	°C	213	200	181	156	117	103	96	91
Коефіцієнт надлишку повітря	α		4,37	5,25	5,67	7,24	10	13,12	16,15	19,09
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	%	2,7	2,2	2	1,6	1,1	0,8	0,7	0,6
Окис азоту	NO <sub>x</sub>	ppm	10	8	6,6	6	6	3	3	2
Температура води на виході з котла	t <sub>1</sub>	°C	79,8	82,3	81,1	79	72,6	70,1	68,4	67,4
Температура води на вході в котел	t <sub>2</sub>	°C	61,3	61,7	61,8	61,9	61,6	61,3	61,1	60,9
Різниця температур	Δt	°C	18,43	20,58	19,33	17,14	11,01	8,8	7,37	6,49
Витрата води	V	м <sup>3</sup> /год	2,58	2,568	2,565	2,586	2,564	2,564	2,557	2,557
Потужність котла	Q	кВт	54,8	59,7	55,5	49,5	31,9	25,4	21,5	18,7
Час (від початку експерименту)	τ	хв.	160	170	175	180	200	225	225	225

Концентрація  $SO_x$  в димових газах повністю залежить від вмісту в паливі горючої сірки. Під час спалювання вугілля в шарових топках до 80% сірки переходить в  $SO_x$ . [6]. Тобто при роботі котла на номінальному навантаженні спостерігаються найбільші викиди  $SO_x$ , оскільки спалюється більше палива. На останніх етапах експерименту, при вигоранні коксового залишку, ми бачимо пониження концентрації оксидів сірки в димових газах (табл.2)

Під час спалювання твердого палива утворення CO відбувається як при вигоранні летких речовин, так і при горінні коксового залишку [6]. В процесі експерименту ми не бачимо явно виражених максимумів чи мінімумів концентрацій CO в димових газах (табл.2), що, на нашу думку, пов'язано з відсутністю понижених температур в зоні горіння, якісно організованою системою подачі повітря в зону горіння, що призводить до ефективного спалювання палива.

На останніх хвилинах експерименту спостерігається підвищення коефіцієнта надлишку повітря, що пов'язано з особливостями автоматики котла. Автоматика налаштована так, що в процесі роботи котла для досягнення необхідного значення температури води на виході з котла, регулюється ввімкнення і вимкнення вентилятора. При догоранні вугілля виділяється кількість теплоти недостатня для нагрівання води до заданого значення, що призводить до ввімкнення вентилятора, який подає більше повітря для інтенсифікації процесу горіння. На рис. 1 наведений порівняльний аналіз екологічних показників котла при роботі на деревині та вугіллі.

Таблиця 2.–Результати дослідження роботи котла на антрациті.

Назва величини	Позначення	Розмірність	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Кисень	O <sub>2</sub>	%	12,1	7,1	6,6	7,9	10,8	12,6	7,5	6,6	7,2	6,6	10,9	11	12,4	10,6	10,6	10,6
Оксид вуглецю	CO	ppm	2895	2789	2739	824	2231	592	1679	2718	1127	2636	2115	2588	2951	1450	2631	2614
Двоокис сірки	SO <sub>2</sub>	ppm	3	15	101	98	100	98	72	106	91	103	8	20	17	19	45	44
Оксид азоту	NO	ppm	36	45	28	26	23	11	31	23	27	23	9	9	7	9	10	11
Двоокис азоту	NO <sub>2</sub>	ppm	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
ККД	η	%	60,6	58,3	81,4	83,3	50,9	78,9	63,5	85,5	65,4	84,7	88	89,4	90,2	87,1	88,2	88,9
Температура відхідних газів	t <sub>г</sub> ,	°C	320	475	229	198	452	188	422	193	403	199	123	112	98	133	127	121
Коефіцієнт надлишку повітря	α		2,35	1,51	1,45	1,6	2,05	2,5	1,55	1,45	1,52	1,45	2,07	2,1	2,44	2,02	2,01	2,05
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	%	5	7,8	8,1	7,3	5,7	4,7	7,6	8,1	7,7	8,1	5,7	5,6	4,8	5,8	5,8	5,7
Окис азоту	NO <sub>x</sub>	ppm	37	46	29	26	23	11	31	23	27	23	9	9	7	9	10	12
Температура води на виході з котла	t <sub>1</sub>	°C	66,5	85,5	83,6	84,6	87,1	82,9	87,8	85,7	82,7	88,3	87,8	87,3	80	90,6	85	85,8
Температура води на вході в котел	t <sub>2</sub>	°C	57	61,5	62,6	62,6	61,9	61,6	60,6	60,6	60,6	60,6	73,3	73,5	70,7	70,6	72,3	71,9
Різниця температур	Δt	°C	9,42	24	23,8	21,94	25,23	22,21	27,17	24,51	22,1	27,48	14,45	13,65	9,1	20	12,73	13,85
Витрата води	V	м <sup>3</sup> /год	2,471	2,55	2,539	2,585	2,676	2,596	2,603	2,563	2,553	2,519	2,556	2,567	2,566	2,581	2,576	2,576
Потужність котла	Q	кВт	26,56	71,22	74,19	62,88	73,33	64,21	78,68	70,5	64,89	77,69	41,48	39,39	26,48	57,18	36,98	40,28
Час (від початку експерименту)	τ	хв.	40	50	65	75	90	100	115	120	135	140	165	170	185	225	235	250

Продовження таблиці 2.



Назва величини	Позначення	Розмірність	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Кисень	O <sub>2</sub>	%	11	10	10	13,3	8,6	10,8	11,8	9,8	11,7	11,3	8,9	11,4	12,7	13,4	14,2
Оксид вуглецю	CO	ppm	2580	2333	24,75	2569	562	2333	2335	1475	2093	2557	735	2285	1773	2923	2266
Двоокис сірки	SO <sub>2</sub>	ppm	48	69	39	20	47	35	22	38	43	27	46	39	9	3	9
Оксид азоту	NO	ppm	11	17	18	12	22	18	13	15	15	13	18	19	20	16	15
Двоокис азоту	NO <sub>2</sub>	ppm	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1
ККД	η	%	89,3	83,8	82,1	88,9	85	83,5	89,6	88,5	85,7	89,5	85,7	83,5	70,8	87,3	85,3
Температура відхідних газів	t <sub>r</sub>	°C	117	182	190	106	182	176	116	136	144	117	170	167	242	114	123
Коефіцієнт надлишку повітря	α		2,14	1,72	1,98	2,72	1,69	2,05	2,28	1,87	2,25	2,16	1,73	2,18	2,53	2,76	3,08
Двоокис вуглецю	CO <sub>2</sub>	%	5,4	6,8	5,9	4,3	6,9	5,7	5,1	6,3	5,2	5,4	6,8	5,4	4,6	4,2	3,8
Окис азоту	NO <sub>x</sub>	ppm	12	18	19	12	23	18	13	16	16	14	19	20	20	16	16
Температура води на виході з котла	t <sub>1</sub>	°C	84,3	86,6	86,4	83,2	87,1	86,7	84,5	86,6	86,5	84,5	87	86,8	86,9	84,6	85,4
Температура води на вході в котел	t <sub>2</sub>	°C	71,7	71,8	72	72,2	71,8	71,7	71,8	71,9	72	72,4	72,7	73	73,8	71,5	73,5
Різниця температур	Δt	°C	12,63	15,06	14,24	11,05	15,58	14,97	12,65	14,71	14,48	11,87	14,35	13,75	13,15	12,96	11,95
Витрата води	V	м <sup>3</sup> /год	2,572	2,568	2,583	2,577	2,592	2,595	2,571	2,583	2,571	2,579	2,585	2,59	2,602	2,588	2,596
Потужність	Q	кВт	36,68	43,49	41,46	31,78	45,48	43,85	36,66	43	41,56	34,67	42,68	39,4	38,74	37,9	34,41
Час (від початку експерименту)	τ	хв.	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	340	370	410

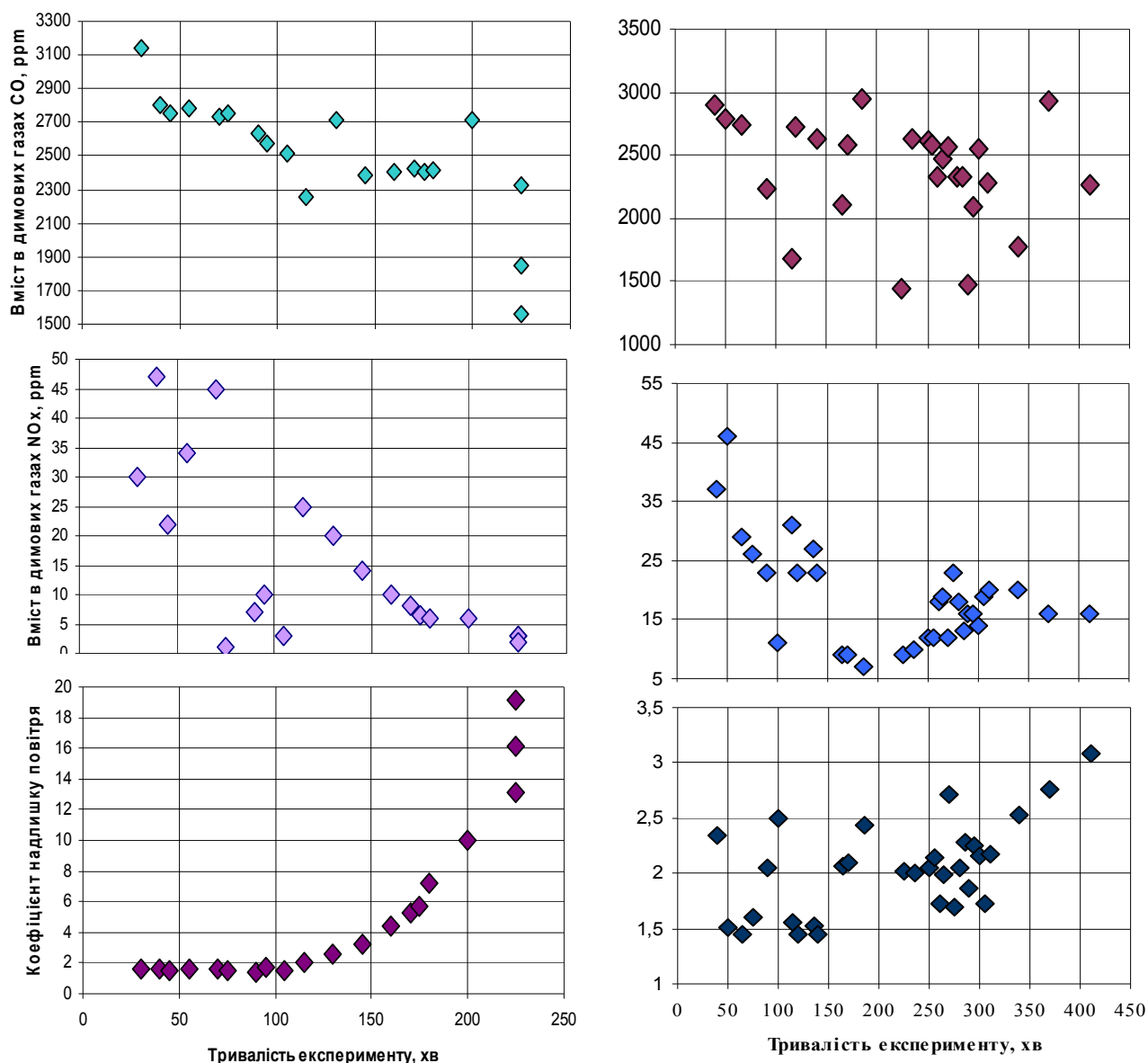


Рис. 1– Порівняльний аналіз екологічних показників котла при роботі на деревині та вугіллі.

Найвища кількість шкідливих викидів (як CO так і NO<sub>x</sub>) спостерігається після завантаження котла в період інтенсивного виходу летких речовин (режим розгорання) – NO<sub>x</sub>=45...25 ppm, на останніх етапах експерименту (вигорання коксового залишку) кількість NO<sub>x</sub> зменшилась більше ніж вдвічі.

Різкого зменшення чи збільшення концентрації окису вуглецю в продуктах горіння як деревини так і вугілля протягом експерименту не

спостерігалось, що пов'язано з роботою котла в нестационарних умовах дугтя. Викиди коливались в межах 1500...3000 ppm (CO)

За даними [ 6 ] при спалюванні вугілля в шарі на колосниковій решітці має місце три механізми утворення оксидів азоту: паливний, термальний, "швидкий". Причому визначальну роль має паливний механізм. Впливом "швидкого можна знехтувати". Максимальна кількість паливних оксидів азоту спостерігається після завантаження котла в період інтенсивного виходу летких речовин (режим розгорання). З табл.2 ми бачимо, що максимум концентрації оксидів азоту в димових газах припадає на навантаження близькі до номінального. Саме такі навантаження були отримані на перших етапах експерименту.

За даними [6] висота шару палива виявляє певний вплив на вихід оксидів азоту. Із збільшенням висоти шару емісія термальних NO<sub>x</sub> буде знижуватись.

На початкових етапах експерименту, коли висота шару палива найвища, сумарні викиди NO<sub>x</sub> в нашому випадку набувають максимальних значень, що суперечить [6]. Це пояснюється тим, що в разі шарового спалювання палива при подачі повітря під колосники, закономірності утворення шкідливих викидів, набувають інший характер, ніж при організації роздачі повітря по зонах. В останньому випадку процес горіння палива більш ефективний.

Отже, для ефективного спалювання твердого палива, необхідно організувати двостадійне спалювання, що призводить до покращення екологічних показників котла. Для надійної роботи котла необхідна якісна автоматика, що сприяє не лише економічному горінню, а й екологічності роботи котла.

## **Висновки**

1. Авторами досліджено показники роботи діючого котла Buderus Funke Logica потужністю 70 кВт на деревині та вугіллі. Показано, що екологічні показники котла при роботі на деревині та вугіллі

- знаходяться в межах 1500...3000 ppm (CO) і 5...45 ppm (NO<sub>x</sub>), що входить в межі норм.
2. Проаналізовано фактори, що впливають на концентрацію шкідливих викидів в продуктах згорання палива.
  3. Найвища кількість шкідливих викидів (як CO так і NO<sub>x</sub>) спостерігається після завантаження котла в період інтенсивного виходу летких речовин (режим розгорання)– NO<sub>x</sub>=45...25 ppm, на останніх етапах експерименту (вигорання коксового залишку) кількість NO<sub>x</sub> зменшилась більше ніж вдвічі.
  4. Різкого зменшення чи збільшення концентрації окису вуглецю в продуктах горіння як деревини так і вугілля протягом експерименту не спостерігалось, що пов'язано з роботою котла в нестационарних умовах дугтя. Викиди коливались в межах 1500...3000 ppm (CO)
  5. Концентрація SO<sub>x</sub> в димових газах залежить від вмісту в паливі горючої сірки і знаходиться в межах 106...10 ppm.
  6. Ефективна робота котла можлива за рахунок ефективного розподілення повітря в топковій камері: частина повітря подається під колосникову решітку, інша частина– через отвори в боковій стінці. Тобто тут мають місце процеси газогенерації.
  7. Отримані результати є кроком до подальших досліджень котлів на органічних відходах з метою систематизації даних і створення обґрунтованих методів розрахунку водогрійних котлів малої потужності на твердому паливі.

### **Література**

1. ГОСТ 30735-2001. Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0,1 до 4 МВт. Общие технические условия.
2. Установки котельные. Установки, работающие на газообразном, жидком и твердом топливе. Нормы выбросов загрязняющих веществ: СТБ 1626.1-2006.– [Дата введения 2006-07-01].–Минск, 2006.–8 с.

3. Накоряков В. Е. Оценка экологической эффективности теплоисточников малой мощности / В. Е. Накоряков, С. Л. Елистратов // Промышленная энергетика.–2009.–№2.– С.44–51.
4. Коваленко Г. В. Исследование сжигания торфа и его смесей с древесиной в 2-х и 3-х камерных топках / Г. В. Коваленко, О. Е. Хлебников, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2005. – №3. – С. 50–55.
5. Котли опалювальні водогрійні теплопродуктивністю до 100 кВт: Методи випробування і контролю теплотехнічних показників: ДСТУ 3948–2000. – [Чинний від 2001-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2000. — 33 с.
6. Борщев В. Д. Защита окружающей среды при эксплуатации котлов малой мощности. –М.: Стройиздат, 1987.–156 с.

Рекомендовано до друку кафедрою теплоенергетики Вінницького національного технічного університету.

**Ткаченко Станіслав Йосипович**, д.т.н., проф., завідувач кафедри теплоенергетики;

**Юзюк Андрій Олександрович**, асистент кафедри теплоенергетики;

**Боднар Лілія Анатоліївна**, к.т.н., старший викладач кафедри теплоенергетики.