

УДК 502.3:662.613.5

О.І. ТЕСЛЕНКО, канд. техн. наук, ORCID: 0000-0002-3772-5991

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ТЕХНОЛОГІЙ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДІВ АЗОТУ ВІД ПОТУЖНИХ ОПАЛЮВАЛЬНИХ КОТЛІВ

Для потужних водогрійних котлів марок ПТВМ-30М, ПТВМ-50, ПТВМ-100, ПТВМ-180, КВГМ-30, КВГМ-50, КВГМ-100, які включені до Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок, розглянуто маловитратні технології зменшення викидів оксидів азоту: рециркуляція димових газів; впорскування води в топкову камеру; подача третинного повітря; ступеневе спалювання палива; малотоксичні пальники зі зниженим утворенням оксидів азоту. Розрахунковим методом визначено техніко-економічні показники для кожної технології: питомі капітальні затрати на впровадження технологічного обладнання (на одиницю встановленої теплової потужності котла) та питомі витрати додаткового споживання паливно-енергетичних ресурсів (на одиницю виробленої теплової енергії), які супроводжують його експлуатацію.

Ключові слова: котли, водогрійні, зменшення викидів, оксиди азоту, технології, техніко-економічні показники.

Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок (НПСВ) [1], схваленим Кабінетом Міністрів України на виконання вимоги Директиви Європейського Парламенту та Ради 2010/75/ЄС «Про промислові викиди (комплексне запобігання і контроль забруднень)» (далі – Директива 2010/75/ЄС) [2] передбачається до 2033 р. зменшення викидів оксидів азоту до рівня вимог цієї Директиви від 20 існуючих великих опалювальних котельних систем централізованого теплопостачання (СЦТ) загальною встановленою тепловою потужністю водогрійних котлів 5444,79 МВт, які використовують в якості основного палива природний газ. Існуючі котли та котельні, які не будуть відповідати вимогам Директиви 2010/75/ЄС, повинні бути виведені з експлуатації та замінені на сучасні більш екологічно безпечні.

Метою аналітично-розрахункових досліджень було визначення техніко-економічних показників маловитратних технологій зменшення викидів оксидів азоту: питомих капітальних затрат на впровадження технологічного обладнання (на одиницю встановленої теплової потужності котла) та питомих витрат додаткового споживання паливно-енергетичних ресурсів (на одиницю виробленої теплової енергії), які супроводжують його експлуатацію.

Об'єктами досліджень були водогрійні газові котли марок ПТВМ-30М, ПТВМ-50, ПТВМ-100, ПТВМ-180, КВГМ-30, КВГМ-50, КВГМ-100, які включені до НПСВ.

За результатами аналізу технологій зі зменшення викидів оксидів азоту NO_x [3–6] для котлів, які спалюють газоподібне паливо, були визначені маловитратні технології для їх застосування на потужних котельних установках СЦТ: рециркуляція димових газів; впорскування води; ступеневе спалювання палива; подача третинного повітря; використання малотоксичних пальників зі зниженим утворенням оксидів азоту.

Вихідні положення по кожній технології визначено за даними, наведеними в [7–9].

Розрахунки обсягів палива, повітря та димових газів, їх ентальпії, зменшення ККД котла, потреб у додатковому паливі виконувались згідно Нормативного методу теплового розрахунку котельних агрегатів [10]. Проектні техніко-економічні показники котлів визначались за [11].

Згідно з рекомендаціями ГКД 34.02.305—2002 [12] за відсутності фактичних даних про елементний склад газоподібного палива при розрахунках були використані значення для природного газу газопроводу Уренгой–Ужгород.

Характеристики природного газу для газопроводу Уренгой–Ужгород наведено в табл. 1. Спо-

© О.І. ТЕСЛЕНКО, 2019

Таблиця 1. Характеристики природного газу для газопроводу Уренгой–Ужгород

Параметр	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S	Q _n ^p	ρ
Розмірність	%	%	%	%	%	%	%	%	МДж/нм ³	кг/нм ³
Значення	98,90	0,12	0,011	0,01	0,00	0,06	0,90	0,00	33,08	0,723

живання палива водогрійним котлом визначали у порядку, наведеному нижче.

Годинна розрахункова витрата палива на номінальному режимі роботи котла визначалась, як

$$B_p^H = \frac{3600 \cdot N_k^H}{\eta^H \cdot Q_n^p}, \text{ м}^3/\text{год},$$

де N_k^H – номінальна теплова потужність водогрійного котла, кВт; Q_n^p – теплотворна здатність газоподібного палива, кДж/м³; η^H – ККД котла на номінальному режимі роботи.

Збільшення споживання палива ΔB (м³/год) внаслідок зменшення ККД водогрійного котла $\Delta \eta = \eta^H - \eta^n$ визначається за формулою

$$\Delta B = \frac{\Delta \eta}{\eta^H} \cdot \frac{3600 \cdot N_k^H}{Q_n^p},$$

де η^H , η^n – ККД котла при номінальній (проектній) та поточній (непроектній) тепловій потужності.

Рециркуляція димових газів (далі – РДГ) (ефективність 10–20%). Оснащення димососами та газоходами. Відхідні димові гази з температурою 150–250 °С рециркуляційними димососами по додатковим газоходам подаються в топкову камеру (або безпосередньо в повітря, що постачається до пальника), внаслідок чого максимальна локальна температура на фронті полум'я знижується на 120–130 °С. Постачання в топкову камеру димових газів з вмістом кисню меншим, аніж у повітрі обумовлює зменшення концентрації кисню в зоні горіння, що також зменшує утворення NO_x. При застосуванні рециркуляції димових газів у топкову камеру ККД котла зменшується на 0,01–0,03% на кожен відсоток ступення рециркуляції та оптимальна ступінь рециркуляції складає 0,20–0,22. Загальне зменшення ККД котла може бути 0,2–0,65%. Для розрахунків було прийнято ступінь рециркуляції димових газів 0,2 та зменшення ККД котла 0,4%. Зростання енергетичних витрат на власні потреби обумовлене додатковим споживанням електроенергії електродвигунами димососів та палива котлом унаслідок зменшення ККД.

Ступінь рециркуляції є співвідношення об'ємної витрати газів рециркуляції V_{rp} до об'ємної витрати димових газів $V_{дг}$ за місцем відбору

$$r = \frac{V_{rp}}{V_{дг}}.$$

Зменшення ККД котла при РДГ:

$$\Delta \eta^{PD} = 0,02 \cdot r,$$

де 0,02 – коефіцієнт зменшення ККД котла на кожен відсоток ступеня рециркуляції.

Додаткове споживання палива при РДГ:

$$\Delta B_{РДГ}^Г = B_p^H \cdot \frac{\Delta \eta^{PD}}{\eta^H}, \text{ м}^3/\text{год}.$$

Витрата димових газів з РДГ при нормальних умовах ($T = 273 \text{ K}$):

$$V_{РДГ} = V_{дг} \cdot (B_p^H + \Delta B_{РДГ}^Г), \text{ м}^3/\text{год}.$$

Витрата димових газів з РДГ при фактичних умовах:

$$V_{РДГ}^t = V_{дг}^t \cdot (B_p^H + \Delta B_{РДГ}^Г), \text{ м}^3/\text{год},$$

де $V_{дг}^t$ – витрата димових газів на 1 м³ палива при температурі димових газів t .

Витрата газів рециркуляції при температурі димових газів t дорівнює

$$V_{РД}^t = r \cdot V_{РДГ}^t, \text{ м}^3/\text{год}.$$

За годинною витратою газів рециркуляції обираються димососи (для котлів потужністю більше 50 МВт щонайменше по одному димососу на кожен сторону водогрійного котла). Для виконання розрахунків були обрані димососи типу ДН-10-1000 та ДН-11-1500 [13] відповідної продуктивності компанії «Вентиляторний завод «Укрвентсистеми»» (м. Харків, Україна) та визначалась ціна продажу.

За електричною потужністю електродвигунів та коефіцієнтом використання потужності димососів визначалось годинне споживання електричної енергії електродвигунами за формулою

$$E_{РДГ}^Г = n_{дгг} \cdot k_{дгг} \cdot (N_{дгг} \cdot \tau) / \tau, \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{год},$$

де $n_{дгг}$ – кількість димососів РДГ, одиниць; $N_{дгг}$ – електрична потужність електродвигуна димососу, кВт; $k_{дгг}$ – коефіцієнт використання установленної електричної потужності електродвигуна димососу; τ – час, дорівнює 1 год.

Для кожного електродвигуна димососів додатково обирались частотні перетворювачі напруги VLT MicroDrive FC 51 [14] компанії DANFOSS (Данія) та визначалась їх ціна продажу.

Впорскування води в топкову камеру (ефективність 15–20%). Оснащення водяними форсунками, водяними насосами та трубопроводами. Для зменшення максимальної локальної температури

на фронті полум'я при згоранні палива у топкову камеру впорскують вологу у вигляді води або водяної пари приблизно 5–6% від маси повітря, яке подається для спалювання палива. Внаслідок цього підвищуються втрати з теплою додатковою водяною пари у відхідних димових газах і зменшується загальна енергоефективність котла. Додаткові витрати палива обумовлюються зменшенням ККД котла (для виробництва однакової теплової енергії потрібно більше палива), для впорскування води необхідна додаткова електроенергія для електродвигунів водяних насосів, а також потрібні додаткові витрати води.

Визначення додаткових витрат на воду для впорскування

Питома витрата води $m_{ВП}$ на впорскування (відносно одиниці об'єму газоподібного палива) визначається за формулами

$$m_{ВП} = k_{ВП} \cdot \alpha_T \cdot V^0 \cdot \rho_{П}, \text{ кг/м}^3,$$

де V^0 – питомий об'єм теоретично необхідного повітря для спалювання одиниці об'єму газоподібного палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α_T – надлишок повітря на виході з топкової камери; $k_{ВП}$ – частка води на впорскування від маси повітря, яке подається для спалювання палива; $\rho_{П}$ – густина повітря, кг/м^3 .

Визначення додаткових витрат палива при впорскуванні

Зменшення ККД котла внаслідок втрати теплоти додаткової водяної пари з відхідними димовими газами визначається за формулою

$$\Delta\eta^{ВП} = \Delta q_2 = \frac{I_{ВП} \cdot m_{ВП} \cdot \rho_{ВП}}{Q_n^p},$$

де $I_{ВП}$, $\rho_{ВП}$ – ентальпія (кДж/м^3) та питомий об'єм водяної пари ($\text{м}^3/\text{кг}$), визначені при температурі відхідних димових газів в [9].

Додаткова витрата палива внаслідок зменшення ККД визначається за формулою, $\text{м}^3/\text{год}$,

$$\Delta B_{ВП}^Г = B_p^H \cdot \frac{\Delta\eta^{ВП}}{\eta^H},$$

де B_p^H , η^H – витрата палива ($\text{м}^3/\text{год}$) та ККД котла на номінальному режимі роботи котла.

Годинна витрата води на впорскування визначається за формулою

$$m_{ВП}^Г = m_{ВП} \cdot (B_p^H + \Delta B_{ВП}^Г), \text{ кг/год.}$$

Визначення додаткових витрат на електроенергію для впорскування

За годинною витратою води на впорскування обирався водяний насос. Для виконання розрахунків були обрані водяний насос типу 3D32-20 [15] з електродвигуном відповідної продуктивності компанії EBARA (Японія) та визначалась ціна продажу компанією-постачальником «WATTON» (Україна).

Для кожного електродвигуна насосу впорскування додатково обирались частотні перетворювачі напруги VLT MicroDrive FC 51 [14] компанії DANFOSS (Данія) та визначалась їх ціна продажу компанією-постачальником «EWI-ENGINEERING» (Україна).

Подача третинного повітря (ефективність 20–30%). Оснащення додатковими вентиляторами, повітропроводами, шліцами для подачі повітря в топкову камеру. Для зменшення максимальної локальної температури на фронті полум'я при згоранні палива повітря для спалювання розподіляється частинами по висоті топкової камери. Розподіл повітря між пальниками, в які подається первинне та вторинне повітря, та третинним повітрям здійснюється наступним чином: безпосередньо в пальники подається частина повітря загальної кількості повітря (з надлишком повітря $\alpha_{П} = 0,80\text{--}0,85$), теоретично необхідного для повного згорання палива. Інша частина повітря подається в топкову камеру вище рівня розташування верхнього ярусу пальників через спеціально обладнані отвори (шліци). Таким чином з використанням третинного повітря остаточно спалюються залишки палива, які не згоріли безпосередньо у факелі пальника внаслідок нестачі окислювача (кисню повітря) в паливно-повітряній суміші пальника. Зростання енергетичних витрат на власні потреби обумовлене додатковим споживанням електроенергії електродвигунами вентиляторів третинного повітря.

Витрата повітря у пальники $V_{П}$ та витрата третинного повітря $V_{ТП}$ визначаються за формулами

$$V_{П} = \alpha_T \cdot V^0, \quad V_{ТП} = (\alpha_T - \alpha_{П}) \cdot V^0,$$

де V^0 , V_P , $V_{П}$, $V_{ТП}$ – питомі об'єми теоретично необхідного повітря, на виході з топкової камери, в пальнику та третинного повітря для спалювання одиниці об'єму газоподібного палива, відповідно, $\text{м}^3/\text{м}^3$; α_T , $\alpha_{П}$ – надлишок повітря на виході з топкової камери та в пальнику, відповідно.

Годинна витрата третинного повітря визначається за формулою

$$V_{ТП}^Г = V_{ТП} \cdot B_p^H,$$

де B_p^H – годинна розрахункова витрата палива, $\text{м}^3/\text{год}$.

За годинною витратою третинного повітря обираються щонайменше два повітряні вентилятори (по одному вентилятору на кожну сторону водогрійного котла). Для виконання розрахунків були обрані вентилятори типу ВДН95-40 [16] відповідної продуктивності компанії «Вентиляторний завод «Укрвентсистеми»» (м. Харків, Україна) та визначалась ціна продажу.

За електричною потужністю електродвигунів та коефіцієнтом використання потужності венти-

ляторів визначалось годинне споживання електричної енергії за формулою

$$E_{ETП}^Г = n_{ВТП} \cdot k_{ВТП} \cdot (N_{ВТП} \cdot \tau) / \tau, \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{год},$$

де $n_{ВТП}$ – кількість вентиляторів третинного повітря, одиниць; $N_{ВТП}$ – електрична потужність двигуна вентилятора, кВт; $k_{ВТП}$ – коефіцієнт використання установленної електричної потужності електродвигуна вентилятора; τ – час, дорівнює 1 год.

Для кожного електродвигуна вентиляторів додатково обирались частотні перетворювачі напруги VLT MicroDrive FC 51 [14] компанії DANFOSS (Данія) та визначалась їх ціна продажу.

Стадійне спалювання (ефективність 30–40%). Реалізація стадійного спалювання (ступеневої подачі повітря) можлива на котлах, на яких пальники розташовані ярусами по висоті топкової камери. У такій ситуації в пальники, які розташовані на нижчому ярусі, подається збагачена паливно-повітряна суміш з нестачею повітря для стехіометричного згорання палива, внаслідок чого при її згоранні частина палива не згорає. При цьому максимальна локальна температура на фронті полум'я в факелі зменшується з 1800–2000 до 1600–1700 К і нижче, що в умовах нестачі окислювача (кисню) призводить до зменшення утворення оксидів азоту. В пальники, які розташовані на вищих ярусах, подається збіднена паливно-повітряна суміш, яка згорає при нижчих максимальних локальних температурах на фронті полум'я, що запобігає інтенсивному утворенню оксидів азоту.

Витрати на впровадження стадійного спалювання визначається тільки витратами на проведення режимно-налагоджувальних робіт та можуть бути обраховані через кількість задіяних працівників (керівник робіт, інженерний персонал, лаборанти) і витрати часу на підготовку та проведення робіт, обробку результатів, підготовку звіту та оренду (амортизацію) вимірювальних приладів (газоаналізаторів) та допоміжного обладнання та інструментів.

Вартість робіт на впровадження стадійного спалювання відносяться до капітальних витрат.

Малотоксичні пальники (ефективність 10–50%). Оснащення сучасними пальниками з низьким рівнем утворення оксидів азоту та вентиляторів до них. Сучасні малотоксичні пальники для спалювання природного газу за останні 15 років стрімко вдосконалювались в напрямку зменшення локальної максимальної температури на фронті полум'я шляхом його стадійного дифузійного спалювання безпосередньо біля пальника. Ефективність таких сучасних пальників стадійного спалювання («пальників з низьким виходом NO_x ») сягає до 50% щодо

зниження викидів оксидів азоту при спалюванні природного газу, що суттєво більше ефективності малотоксичних пальників початку 2000-х років (до 20%). В Європейському Союзі введена класифікація таких малотоксичних пальників, які відповідають вимогам Директиви 2010/75/ЄС та запобігають утворенню оксидів азоту з коефіцієнтом емісії не більше 80 мг/кВт·год (клас 3, еквівалентно концентрації оксидів азоту 96 мг/м³ в димових газах при вмісті $\text{O}_2 = 3\%$) та прийшли на заміну пальникам першого класу (170 мг/кВт·год) та другого класу (120 мг/кВт·год). Компанія UNIGAS (Італія) [17, 18] пропонує пальники, які з рециркуляцією димових газів в повітря, призначене для спалювання природного газу, можуть забезпечити наднизьку емісію оксидів азоту (до 50 мг/кВт·год і навіть до 20 мг/кВт·год). Саме ці малотоксичні пальники призначені для обладнання котлів опалювальних котельнь, розташованих в великих містах з щільною житловою забудовою, де забезпечення низьких концентрацій забруднюючих речовин є пріоритетним завданням.

Енергетичні витрати на власні потреби обумовлені споживанням електроенергії електродвигунами вентиляторів.

Затрати на впровадження малотоксичних пальників визначається вартістю самих пальників та допоміжного обладнання, які зазвичай постачаються в загальному комплекті (пальники, вентилятори, перетворювачі частоти напруги та комп'ютеризована система автоматизованого управління), а також вартістю монтажних-налагоджувальних робіт та розробки проектно – кошторисної документації.

Вибір малотоксичних пальників, димососів, вентиляторів, водяних насосів, частотних перетворювачів напруги для електродвигунів цих пристроїв з визначенням їх вартості станом на 2019 р. проводився за пропозиціями постачальників обладнання [13–18].

Питомі витрати додаткової електроенергії e_{ei} (кВт·год/кВт·год), питомі витрати додаткового палива e_{vij} (ГДж/кВт·год) та питомі витрати води на впорскування $e_{vпij}$ (м³/кВт·год) при впровадженні i -тої технології зменшення викидів оксидів азоту на водогрійному котлі j -тої марки віднесені на годинне виробництво теплової енергії визначались за формулами

$$e_{ei} = E_{ij}^Г / (N_{kj}^H \cdot \tau);$$

$$e_{vij} = (\Delta B_{ij}^Г \cdot Q_H^p) / (N_{kj}^H \cdot \tau);$$

$$e_{vпij} = m_{vпij}^Г / (N_{kj}^H \cdot \tau),$$

де $(N_{kj}^H \cdot \tau)$ – годинна теплова продуктивність водогрійного котла марки j , кВт·год.

Вартість капітальних затрат на впровадження технологій зменшення викидів оксидів азоту складається з затрат на основне обладнання (димососи, вентилятори, насоси та частотні перетворювачі), додаткове обладнання (газоходи, повітропроводи, трубопроводи, арматура, контрольно-вимірювальні прилади, системи управління тощо), монтажньо-будівельні та пусконаладжувальні роботи, а також розробку проектно-кошторисної документації. Капітальні витрати на впровадження стадійного спалювання визначаються тільки витратами на проведення режимно-налагоджувальних робіт.

Питомі капітальні затрати на впровадження *i*-ої технології зменшення викидів оксидів азоту віднесені на теплову потужність N_{kj}^H водогрійного котла марки *j* визначались за формулою

$$K_{ji} = K_{ji} / N_{kj}^H, \text{ грн/кВт},$$

де K_{ji} – капітальні затрати на впровадження *i*-ої технології на котлі марки *j*, грн.

Аналіз результатів розрахунків

Потужні водогрійні котли марок ПТВМ та КВ-ГМ, які на поточний час знаходяться в експлуатації у складі опалювальних котелень СЦТ України, при спалюванні природного газу утворюють викиди оксидів азоту на рівні 210–240 мг/м³ при вмісті $O_2 = 3\%$ в димових газах [4]. Умови Директиви 2010/75/ЄС вимагають, щоб рівень викидів оксидів азоту від таких великих спалювальних установок (тепловою потужністю 50 МВт і більше) не перевищував 100 мг/м³, тобто потрібно зменшити викиди NO_x щонайменше на 55–60% від поточного рівня.

При виборі заходів зменшення викидів оксидів азоту при спалюванні природного газу надають перевагу режимно-технологічним методам з технологіями, які запобігають первинному утворенню оксидів азоту: установка малотоксичних пальників в існуючі амбразури топкової камери без суттєвих змін поверхонь нагріву під тиском, ступеневе спалювання з розподіленням палива між ярусами пальників, рециркуляція димових газів та подача третинного повітря вище факела згорання палива в пальниках або комбінований метод із застосуванням 2–3 наведених технологій.

У табл. 2 представлена ефективність первинних (режимно-технологічних) заходів зменшення викидів NO_x на спалювальних установках, які є мало витратними порівняно з технологіями очищення димових газів від вже утворених оксидів азоту. Наприклад, впровадження технології селективного некаталітичного відновлення потребує 10–20 \$/кВт установленої теплової потужності; а технології селективного каталітичного відновлення потребує 50–100 \$/кВт установленої теплової потужності.

Таблиця 2. Ефективність первинних заходів скорочення викиду NO_x [12]

Тип первинних (технологічно-режимних) заходів	Ефективність
Малотоксичні пальники	0,20–0,50*
Ступенева подача повітря	0,30
Подача третинного повітря	0,20
Рециркуляція димових газів	0,10
Впорскування вологи в топкову камеру	0,10
Трьохступенева подача повітря та палива	0,35
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря	0,45
Малотоксичні пальники + подача третинного повітря	0,40
Малотоксичні пальники + рециркуляція димових газів	0,30
Ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,45
Ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,40
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + рециркуляція димових газів	0,50
Малотоксичні пальники + ступенева подача повітря + подача третинного повітря	0,60

* – сучасні малотоксичні пальники мають ефективність 0,5 і більше.

У табл. 3 представлено зведені результати розрахунків техніко-економічних показників технологій зменшення викидів оксидів азоту для водогрійних котлів марок ПТВМ-30М, ПТВМ-50, ПТВМ-100, ПТВМ-180, КВГМ-30, КВГМ-50, КВГМ-100, які спалюють природний газ, а саме питомих капітальних витрат на впровадження технологічного обладнання (на одиницю встановленої теплової потужності котла) та питомих витрат додаткового споживання паливно-енергетичних ресурсів (на одиницю виробленої теплової енергії), які супроводжують його експлуатацію, для кожної з досліджених технологій.

Порівняльний аналіз питомих капітальних затрат на впровадження технологій показує, що найбільші значення має впровадження малотоксичних пальників зі зниженим утворенням оксидів азоту (від 152523 до 261691 грн/МВт), однак сучасні малотоксичні пальники мають ефективність зменшення утворення до 0,5 внаслідок того, що в своїй конструкції реалізують стадійне спалювання. Інноваційні малотоксичні пальники, які додатково до конструктивної реалізації стадійного спалювання забезпечують подачу газів рециркуляції безпосередньо в паливно-повітряну суміш, мають загальну ефек-

Таблиця 3. Техніко-економічні показники технологій зменшення викидів оксидів азоту для водогрійних котлів

Технологія, показник /марка котла	ПТВМ-30М	ПТВМ-50	ПТВМ-100	ПТВМ-180	КВГМ-30	КВГМ-50	КВГМ-100
Теплова потужність (номінальна), МВт	40,70	58,20	116,30	209,34	34,90	58,20	116,30
1. Рециркуляція димових газів							
1.1. Питомі капітальні затрати, грн/МВт*	11060	9223	9231	8877	12898	9223	9231
1.2. Питомі витрати електроенергії, кВт·год/МВт·год	0,264	0,297	0,298	0,522	0,395	0,288	0,218
1.3. Питомі витрати палива, ГДж/МВт·год	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,016
2. Впорскування води до топкової камери							
2.1. Питомі капітальні затрати, грн/МВт*	3045	2129	1066	592	3551	2129	1066
2.2. Питомі витрати електроенергії, кВт·год/МВт·год	0,074	0,052	0,026	0,014	0,086	0,052	0,026
2.3. Питомі витрати палива, ГДж/МВт·год	0,190	0,196	0,198	0,197	0,189	0,188	0,169
2.4. Питомі витрати води, м ³ /МВт·год	0,072	0,073	0,073	0,073	0,071	0,070	0,069
3. Подача третинного повітря							
3.1. Питомі капітальні затрати, грн/МВт*	5092	4394	2940	3855	5938	4394	2940
3.2. Питомі витрати електроенергії, кВт·год/МВт·год	0,108	0,103	0,103	0,115	0,126	0,103	0,103
4. Стадійне спалювання							
4.1. Питомі капітальні затрати, грн/МВт*	2236	2835	1892	1540	---	---	1892
5. Малотоксичні пальники							
5.1. Питомі капітальні затрати, грн/МВт*	224399	239410	209413	152523	261691	228059	217069
5.2. Питомі витрати електроенергії, кВт·год/МВт·год	2,64	2,61	2,59	2,10	2,64	3,18	3,21

* – в цінах 2019 р.

тивність зменшення утворення оксидів азоту більше 0,7.

Інші технології мають суттєво менші питомі капітальні затрати на їх впровадження:

- рециркуляція димових газів: від 8877 до 12898 грн/МВт;

- впорскування води: від 592 до 3551 грн/МВт;

- подача третинного повітря: від 2940 до 5938 грн/МВт;

- ступеневе спалювання палива: від 1540 до 2236 грн/МВт.

Однак ці технології супроводжуються додатковими (експлуатаційними) витратами паливно-енергетичних ресурсів: електроенергії, природного газу та води. Витрати електроенергії електродвигунами вентиляторів для подачі повітря в пальники можна віднести до загальних витрат технологічного процесу вироблення котлом гарячої води.

Таким чином, для проведення модернізації існуючих потужних котельень СЦТ задля їх відпо-

відності вимогам Директиви 2010/75/ЄС щодо викидів оксидів азоту доцільно впроваджувати комбінований метод із застосуванням інноваційних малотоксичних пальників з рециркуляцією димових газів безпосередньо в паливно-повітряну суміш.

ВИСНОВКИ

Для водогрійних газових котлів марок ПТВМ-30М, ПТВМ-50, ПТВМ-100, ПТВМ-180, КВГМ-30, КВГМ-50, КВГМ-100, які увійшли до Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок, розрахунковим методом були визначені техніко-економічні показники, а саме питомі капітальні затрати на впровадження технологічного обладнання (на одиницю встановленої теплової потужності котла) та питомі витрати додаткового споживання паливно-енергетичних ресурсів (на одиницю виробленої теплової енергії), які супроводжують його експлуатацію, для наступних технологій зменшення

викидів оксидів азоту: рециркуляція димових газів; впорскування води в топкову камеру; подача третинного повітря; ступеневе спалювання палива; малотоксичні пальники зі зниженим утворенням оксидів азоту.

Найбільш ефективним комбінованим режимно-технологічним методом зменшення викидів оксидів азоту до рівня вимог Директиви 2010/75/ЄС є інноваційні малотоксичні пальники з рециркуляцією димових газів безпосередньо в паливно-повітряну суміш: сумарні питомі капітальні затрати становлять від 160 до 280 тис. грн/МВт встановленої теплової потужності котла, додаткові витрати електроенергії визначається виключно її споживанням димососами рециркуляції димових газів від 0,2 до 0,56 кВт·год/МВт·год теплової енергії, виробленої водогрійним котлом.

Визначення наведених показників дозволяє оцінити вплив впровадження технологій зменшення викидів оксидів азоту на економічні характеристики виробництва теплової енергії потужними водогрійними котлами опалювальних котельень системи централізованого тепlopостачання України.

Робота виконана за рахунок коштів бюджетної програми «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» (КПКВ 6541230).

1. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 8 листопада 2017 року № 796-р. URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245255506&cat_id=245255478// (дата звернення: 02.08.2019).
2. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control): Official Journal of the European Union. 2010. 17 December. Vol. 53. 119 p.
3. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants/ Thierry Lecomte et al.: Publications Office of the European Union. 2017. 986 p.
4. Сміхула А.В. та ін. Технології зниження шкідливих викидів до атмосфери тепловими електростанціями та котельними великої і середньої потужності України: монографія. К.: ФОП Маслаков, 2019. 107 с. ISBN 978-617-7777-05-1.
5. Информационно-технический справочник по наилучшим технологиям ИТС 38-2017. Сжигание топлива на крупных установках с целью производства энергии. М.: Бюро НТД, 2017. 280 с.
6. Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації / ред. А.А. Долінський та ін. К., 2007. Т. 2. С. 538—568.
7. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива: монография. Л.: Недра. 1988. 313 с.
8. Сигал И.Я. Сжигание газа в котлах и защита воздушного бассейна. *Энерготехника и энергосбережение*. № 4. 2009. С. 26—35.
9. Dolinskiy A., Sigal A.I. The Influence of Moisture in Air on the Working Efficiency of Boilers in the Industrial and Municipal Energy Sectors. In: Syred N., Khalatov A. (eds). *Advanced Combustion and Aerothermal Technologies*. NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security. Dordrecht. Springer. 2007. P. 331—339.
10. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / Под ред. Г.М. Кагана. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: ВТИ, 1998. 260 с.
11. Справочник по котельным установкам малой производительности / Под ред. К.Ф. Роддатиса. М.: Энергоатомиздат, 1989. 488 с.
12. ГКД 34.02.305—2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002. 07. 01]. Київ: ОЕП ГРІФРЕ. 2002. 45 с. (Галузевий керівний документ).
13. Димососи ДН. Вентиляторний завод Укрвентсистеми. URL: <http://ukrvent.com/dn-html/> (дата звернення: 02.08.2019).
14. Частотні перетворювачі DANFOSS. URL: <https://ewi-engineering.com.ua/danfoss-vlt-micro-drive-fc-51-55-kvt-380-v.html> (дата звернення: 02.08.2019).
15. Промислові насоси EBARA. WATTON. URL: <https://watton.ua/uk/vodosnabzhenie/nasosy/promyshlennye-nasosy/ebara/> (дата звернення: 02.08.2019).
16. Вентилятори ВДН. Вентиляторний завод Укрвентсистеми. URL: <http://ukrvent.com/vdn-html/> (дата звернення: 02.08.2019).
17. С.І.В. UNIGAS S.p.A. Промышленные горелки. Технический каталог и прайс-лист. 2012. 178 с. URL: <http://www.cibunigas.com/ru/product-catalogs> (дата звернення: 02.08.2019).
18. С.І.В. UNIGAS S.p.A. Горелки. Каталог продукции от 480 кВт до 19000 кВт. 2019. 310 с. URL: http://www.cibunigas.com/ru/product-catalogs_ (дата звернення: 02.08.2019).

Надійшла до редколегії: 12.08.2019