

*М. О. ЛОГВИНЮК, Є. В. НОВАКІВСЬКИЙ***ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ NO_x, ШЛЯХОМ СТУПЕНЕВОГО СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВА**

В статті розроблена математична модель розрахунку утворення оксидів азоту по висоті топки котла, при різних розподіленнях теплового навантаження в топочній камері. Наведені результати надають можливість визначити сумарну кількість утворених оксидів азоту в котлі, та надають можливість забезпечувати екологічні показники котла при регулювання концентрації повітря по ярусах пальників.

Ключові слова: зменшення викидів NO_x, ступеневе спалювання палива, розподілення теплового навантаження по висоті топки.

*М. А. ЛОГВИНЮК, Е. В. НОВАКОВСКИЙ***УМЕНЬШЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x, ПУТЕМ СТУПЕНЧАТОГО СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА**

В статье разработана математическая модель расчета образования оксидов азота по высоте топки котла, при различных распределениях тепловой нагрузки в топочной камере. Приведенные результаты позволяют определить суммарное количество образованных оксидов азота в котле, и дают возможность обеспечивать экологические показатели котла при регулировании концентрации воздуха по ярусам горелок.

Ключевые слова: уменьшения выбросов NO_x, ступенчатое сжигания топлива, распределения тепловой нагрузки по высоте топки.

*М. LOHVYNIUK, Y. NOVAKIVKIY***DECREASING NO_x EMISSIONS BY WAY OF THE STAGED FUEL COMBUSTION**

The purpose of this scientific paper was to analyze the mathematical model built for the staged arrangement of the fuel combustion system and calculate the formation of nitrogen oxides throughout the boiler furnace height for the different distributions of thermal loadings along the full vertical extent of the combustion chamber. The obtained results enable the determination of the overall amount of nitrogen oxides formed in the boiler and it allows us to provide appropriate ecological indices for the boiler when regulating the air concentration in the burner rows. In practice, to suppress the formation of nitrogen oxides we often use such basic methods as low-toxic burners, staged fuel combustion, flue gas recirculation, etc. The analysis of the computations done allows us to draw a conclusion that the operation of the boiler with ecological indices that satisfy standard values of the European Directive 2010/75/EU is only possible for the load below 40 %. After reconstruction of the burner system and adjustment of the air supply system with the observation of above ecological norms the boiler power can be increased up to 80 % using the staged fuel burning with the ensurance of environmental performances during its operation. Computational and experimental data errors varied in the range of 8 % to 12 %. With the increase in the overall chemical incomplete combustion by 40 % to 60 % (q_3) these losses are compensated by a decrease in absolute losses due to the boiler aggregate load and the losses through external walls (q_5) due to an increase in the boiler power.

Key words: a decrease in NO_x emissions, the staged fuel combustion, the furnace height thermal load distribution.

Вступ

На сьогоднішній день до основних критеріїв роботи водогрійних та парових котлів середньої та великої потужності відноситься екологічна робота котла. В світовій практиці для вирішення проблем NO_x, використовують ступеневе спалювання. В сучасних умовах експлуатації котельних агрегатів в Україні, більшість з яких знаходяться в критичному стані та потребують реконструкції відносять як подовження терміну роботи котла та енергоблоку в цілому, збільшення його ККД так і зменшення шкідливих викидів оксидів азоту, відповідно до сучасних європейських норм [1].

В даній роботі було проаналізовано як змінюється концентрація оксидів азоту по висоті топки котла при різній кількості пальників та при різних навантаженнях котла.

Мета роботи

Розрахунок екологічних показників, а саме концентрації NO_x у викидах котлів є невід'ємною

частиною розробки нових чи реконструкції існуючих котлоагрегатів [2], тому в сучасних умовах потрібно мати можливість контролювати процеси утворення оксидів азоту. На сьогодні згідно директиви ЄС максимальна концентрація NO_x для котлів, що працюють на газо-мазутному паливі складає від 250 мг/м³ до 500 мг/м³ при концентрації кисню в продуктах згорання 3% в залежності від потужності котла [3].

На практиці більшість котельного обладнання, що експлуатується на сьогоднішній день ці показники перевищує [3]. Серед методів зниження оксидів азоту є основні методи [3]:

- 1 Малотоксичні пальники.
- 2 Триступінчасте спалювання палива (відновник – вугілля).
- 3 Триступінчасте спалювання палива (відновник – природний газ).
- 4 Ступеневе спалювання палива
- 5 Рециркуляція димових газів.
- 6 Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ).
- 7 Селективне каталітичне відновлення (СКВ).

© М. О. Логвинюк, Є. В. Новаківський, 2021

Опис та вирішення проблеми

Мета організації триступеневого спалювання на енергетичних котлах полягає у відновленні NO_x до молекулярного азоту. Основою для організації даного методу є розбиття зони активного горіння (ЗАГ) на зони: головна, відновлення та допалювання. В головній зоні відбуваються звичайні процеси горіння, в дану зону надходить близько 65 %–85 % (за теплою) палива, та при надлишку повітря 1,02–1,05. В зоні відновлення відбувається введення більш реакційного палива, за звичай природний газ в кількості 15 %–35 % (за теплою) при коефіцієнті надлишку повітря 0,85–0,95, в даній зоні відбуваються складні хімічні процеси, які відбуваються при високих температурних режимах. В зоні допалювання відбувається процес введення третинного повітря, куди подають залишок потрібного для вигорання повітря, наприклад 15 %–20 % відбору повітря після повітропідігрівача [1–2].

Для аналізу поставленої проблеми було обрано котел Е-58-18-280. Дані котли використовуються як пуско-резервні котли на ТЕС та АЕС і як правило експлуатуються на газомазутному паливі. Було запропоновано замінити стандартні пальники, що розташовані в два яруси (для газомазутного палива) або одноярусне для твердого, на пристрої меншої потужності але зі збільшенням їх кількість та розташувати по кутах топки в чотири яруси. Таке рішення дозволяє розтягнути зону активного горіння по висоті топки, що в свою чергу призведе до рівномірного розподілення теплового навантаження на екранні труби по висоті топки, зокрема в зоні активного горіння [4].

Зміна компоновки пальникових пристроїв призведе до зменшення максимальних локальних температур в топці котла [4]. Зникають явно виділені зони максимального теплового навантаження, які в межах зон активного горіння та зони I мають відхилення більш ніж на 100 % (для одного двоюрисного розташування). Порівнюючи одного двоюрисного розташування пальників можна зробити висновки, що при збільшенні кількості пальників зона максимального теплового навантаження збільшується по висоті при зменшенні абсолютного значення [4]. Відповідно до зміни локальних теплових навантажень по висоті топки змінюється і температура димових газів по висоті, відповідно до цього можна запропонувати рішення з використанням нетрадиційних методів спалювання в нашій державі, такі як ступінчасте спалювання палива [3].

Відповідно до вищесказаного було проведено розрахунок концентрації NO_x в залежності від навантаження парового котла, на рис. 1 та в табл. 1 наведено зміну концентрації NO_x в залежності від

потужності котла при одноярусному двоюрисному та чотириюрисному розташуванні пальників.

Таблиця 1 – Концентрація NO_x в залежності від потужності котла (в тому числі повітряні та паливні)

Найменування	Величина			
	40	60	80	100
Потужність котла B_p , %				
Одноярусне розташування NO_x , г/м ³	0,306	0,42	0,527	0,63
Двоюрисне розташування NO_x , мг/м ³	0,286	0,398	0,505	0,61
Чотириюрисне розташування NO_x , мг/м ³	0,265	0,375	0,482	0,589

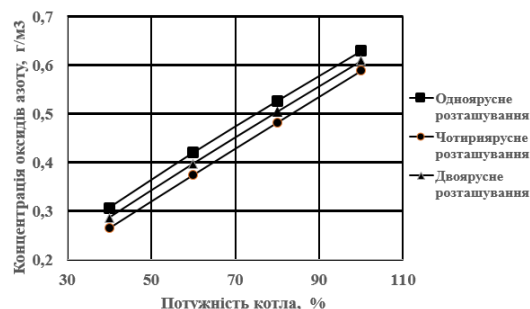


Рис. 1 – Концентрація NO_x в залежності від потужності котла

При зміні розташування пальників змінюється температура в зоні активного горіння та відповідно знижується утворення призводить до зменшення NO_x орієнтовно на 10 %–13 % (від одного до чотириюрисного розташування), це зниження є лінійним в залежності від навантаження котла.

Авторами пропонується окрім розтягування факелу при багатоярусному розташуванні пальників застосувати ступеневе спалювання при рівномірній подачі палива по ярусам пальників з перерозподілом повітря при постійному сумарному об'ємі повітря при коефіцієнті надлишку повітря 1,06, також авторами розглядається хімічний недопал при перерозподілі повітря.

Було проведено розрахунок зміни концентрації оксидів азоту по висоті топки котла при різних коефіцієнтах надлишку повітря в кожній зоні відповідно до матриці експериментів, що наведено в табл. 2. Для кожного варіанта матриці розрахунку проводяться при потужності від 40 %–100%.

Дана система ступеневого спалювання дозволить кардинально зменшити екологічні показники котла, насамперед зменшити викиди оксидів азоту. Розрахункові характеристики топки, визначенні попередньо в [3]. Перед початком розрахунків розбиваємо зону активного горіння на чотири рівних частини та зону догорання на три частини, висота зони догорання приймається як різниця висоти топки та зони активного горіння.

Модель горіння а відповідно і виділення оксидів азоту пов'язано з двома основними процесами, що відбуваються в котлі: перший це виділення теплоти, другий відповідно відвід теплоти в продукти згорання палива [3]. Результати розрахунків NO_x для кожного з експериментів представлено в графічному вигляді рис. 2–7, де утворення NO_x відповідає кожному пальнику, місцю введення кисню, а в табл. 2 представлено сумарна кількість NO_x по зонах.

При визначенні хімічного недопалу при різних розподілах коефіцієнта надлишку повітря по ярусам пальників при різних навантаженнях котла (по висоті зони активного горіння) потрібно вра-

ховувати зміну відношення швидкостей первинного та вторинного повітря для кожного яруса пальників при різній потужності. Із досвіду експлуатації подібних котлів при регулюванні котлів та зменшенні потужності пальників в першу чергу зменшують витрату вторинного повітря, при постійній витраті первинного повітря. Коефіцієнт надлишку повітря в першу чергу впливає на кількість хімічного недопалу в котлі. Оптимальне значення коефіцієнта надлишку повітря для газомазутних котлів знаходиться в межах 1,02–1,1, в нашому випадку середнє значення даного коефіцієнта для всіх експериментів відповідає значенню 1,06.

Таблиця 2 – Матриці експериментів моделювання зміни NO_x в залежності від зміни коефіцієнту надлишку повітря по висоті зони активного горіння (ЗАГ)

Параметр	Експеримент											
	1				2				3			
$V_p, \%$	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
α	1,0	1,0	1,07	1,13	1,05	0,8	1,05	1,3	1,05	1,05	0,8	1,3
$\text{NO}_x, \text{г/м}^3$	0,245	0,32	0,385	0,44	0,25	0,326	0,39	0,444	0,21	0,23	0,26	0,3

Кінець таблиці 2

Параметр	Експеримент											
	4				5				6			
$V_p, \%$	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
α	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3	0,8	0,8	1,3	1,05	1,05	0,7	1,4
$\text{NO}_x, \text{г/м}^3$	0,29	0,38	0,455	0,517	0,305	0,39	0,468	0,53	0,19	0,217	0,249	0,284

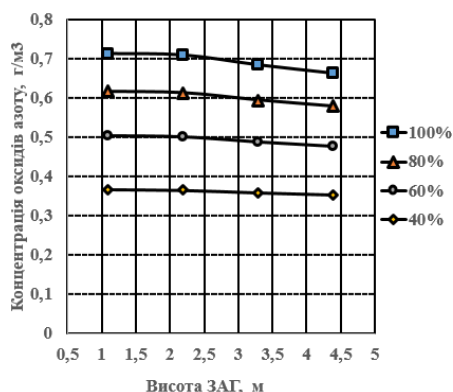


Рис. 2 – Зміна концентрації NO_x , експеримент 1

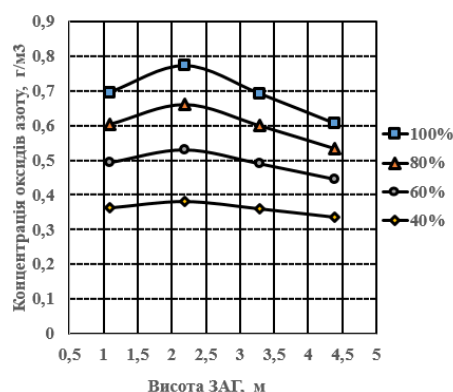


Рис. 3 – Зміна концентрації NO_x , експеримент 2

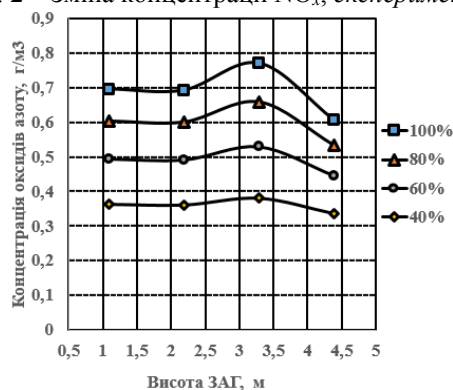


Рис. 4 – Зміна концентрації NO_x , експеримент 3

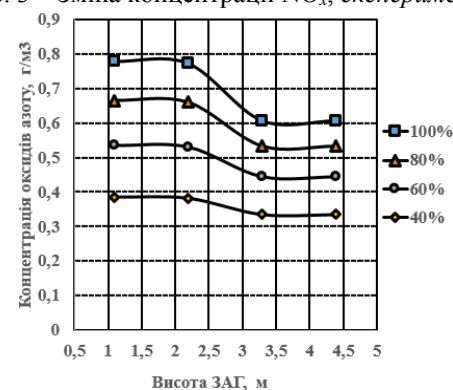


Рис. 5 – Зміна концентрації NO_x , експеримент 4

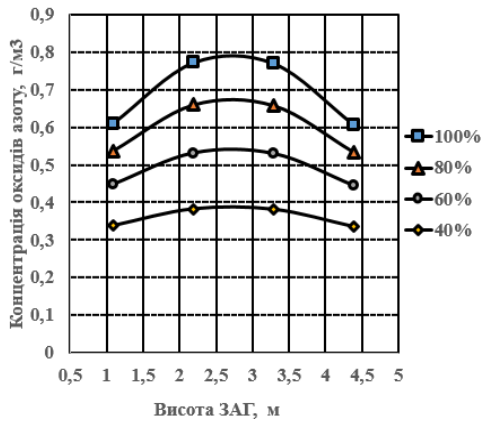


Рис. 6 – Зміна концентрації NO_x, експеримент 5

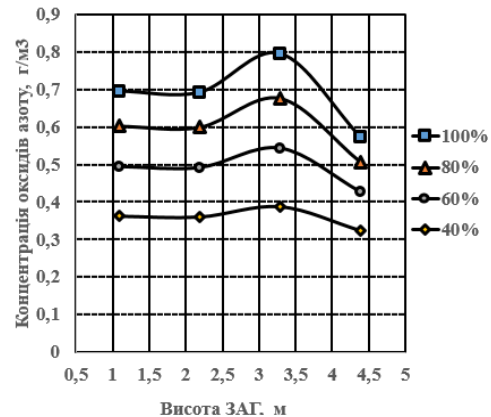


Рис. 7 – Зміна концентрації NO_x експеримент 6

Таблиця 3 – Матриці експериментів моделювання зміни q_3 в залежності від зміни коефіцієнту надлишку повітря по висоті зони активного горіння (ЗАГ)

Параметр	Експеримент											
	1				2				3			
$B_p, \%$	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
α	1,0	1,0	1,07	1,13	1,05	0,8	1,05	1,3	1,05	1,05	0,8	1,3
$q_3, \%$	0,22	0,27	0,3	0,33	0,23	0,28	0,33	0,38	0,52	0,58	0,62	0,68

Кінець таблиці 3

Параметр	Експеримент											
	4				5				6			
$B_p, \%$	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
α	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3	0,8	0,8	1,3	1,05	1,05	0,7	1,4
$q_3, \%$	0,6	0,66	0,72	0,85	0,58	0,64	0,7	0,83	0,64	0,74	0,83	0,92

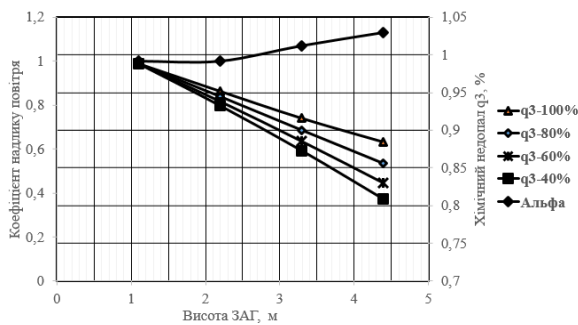


Рис. 8 – Зміна q_3 , експеримент 1

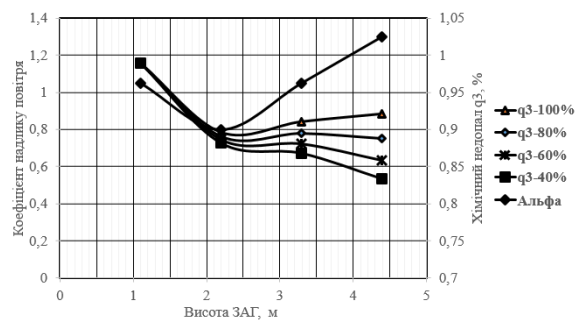


Рис. 9 – Зміна q_3 , експеримент 2

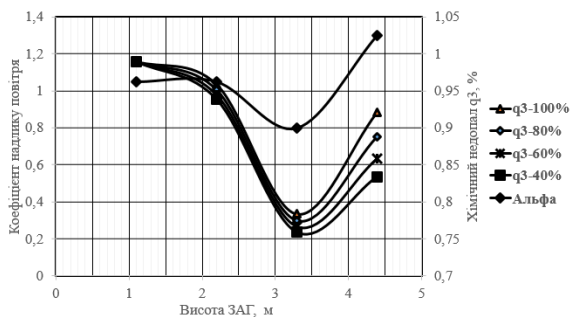


Рис. 10 – Зміна q_3 , експеримент 3

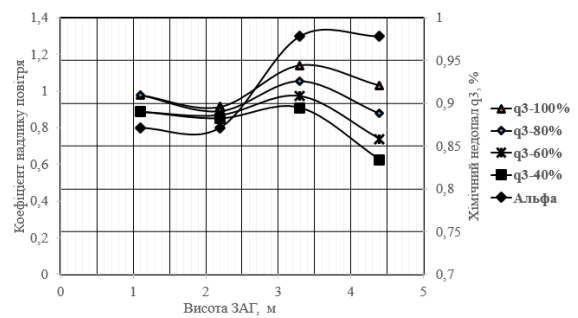


Рис. 11 – Зміна q_3 , експеримент 4

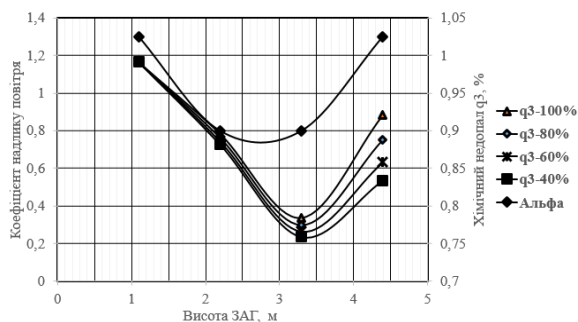
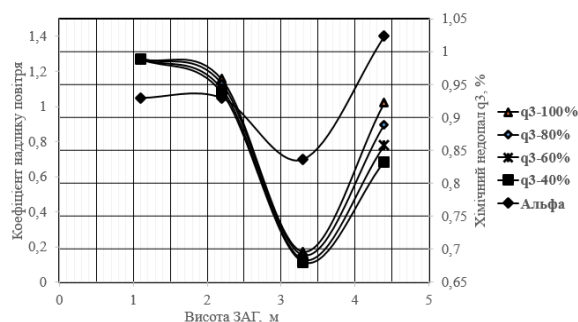
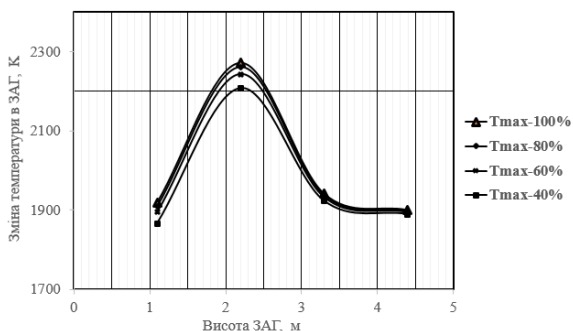
Рис. 12 – Зміна q_3 , експеримент 5Рис. 13 – Зміна q_3 , експеримент 6

Рис. 14 – Зміна температури в ЗАГ

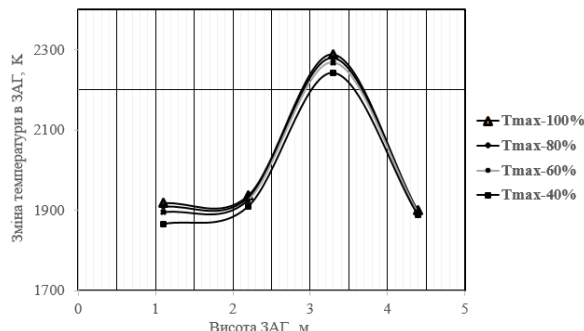


Рис. 15 – Зміна температури в ЗАГ

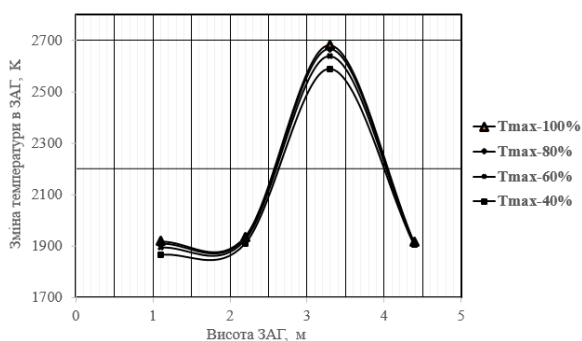


Рис. 16 – Зміна температури в ЗАГ

Разом з утворенням NO_x були побудовані графіки розподілу хімічного недопалу в залежності від коефіцієнту надлишку повітря на кожному пальнику [6, 7], що зображено на рис. 8–13, та в табл. 3.

З проведених розрахунків що представлені в табл. 2 оптимальними варіантами є експерименти 3 та 6, в яких сумарна кількість утворення NO_x є мінімальним. Найгіршими варіантами є експерименти 4–5. Такі результати можуть бути пояснені тим, що на зону третього яруса пальників з чотирьох, приходиться максимальна температура в зоні активного горіння. Зменшуючи коефіцієнт надлишку повітря до $\alpha = 0,7-0,8$ при максимальних температурах, пригнічується утворення NO_x . В експериментах 4–5 відбулося навпаки, на зону максимальних температур прийшовся максимальний надлишок повітря, що призвело до максимального утворення NO_x при потужності від 40 % до 100 %. Такі висновки підтверджуються графіками що представлені га рис. 14–16. Згідно з експери-

ментальних розрахунків можна зробити висновки, що для ступеневого спалювання оптимальним є варіант подачі нормальної кількості повітря на нижні яруси для запалювання палива, мінімальна кількість повітря в зону максимальних температур та решту кисню у верхню частину зони активного горіння. На рис. 14–16 представлено розподіл температури в зоні активного горіння по висоті топки для відповідних експериментів.

При перерозподілі повітря на пальниках зокрема при зменшенні коефіцієнту надлишку повітря в зоні максимальних температур експерименти 3 та 6, збільшується сумарний хімічний недопал в зоні активного горіння, при цьому q_3 зростає на 40 %–60 % при зниженні NO_x на 20 %–35 %.

Відповідно до даних розрахунків було встановлено оптимальний розподіл повітря при якому будуть забезпечені екологічні показники котла при збереженні його навантаження, даний розподіл відповідає експерименту 6 [6, 7].

Дані математичної моделі ступеневого спалювання палива, та визначення екологічних характеристик котла, було експериментально встановлено при яких потужностях можна експлуатувати котел, щоб відповідати екологічних нормативним значення директиви [1, 4]. В табл. 4 наведено порівняння сумарної кількості NO_x та потужність котла при яких котел експлуатується забезпечуючи екологічні норми.

Відповідно з табл. 4 можна зробити висновки, що після реконструкції котла, його потужність можна збільшити до 80 % використовуючи ступенево спалювання палива та забезпечивши при цьому екологічні показники його роботи.

Таблиця 4 – Порівняння сумарної кількості NO_x та потужність котла при яких котел експлуатується забезпечуючи екологічні норми

Параметр	Стандартне розташування пальників (двоюрисне)				Експеримент 3 (чотирирярусне, ступеневе спалювання)				Експеримент 6 (чотирирярусне, ступеневе спалювання)			
	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
B _p , %	40	60	80	100	40	60	80	100	40	60	80	100
NO _x сумарне, г/м ³	0,286	0,398	0,505	0,61	0,21	0,23	0,26	0,3	0,19	0,217	0,249	0,284

Висновки

З аналізу проведених розрахунків можна зробити наступні висновки. що при експлуатації котла до реконструкції ми маємо можливість його роботи лише при 40 % навантаженні, при зберіганні екологічних показників, але після реконструкції потужність можна збільшити до 80 % за рахунок реконструкції топочної камери та зміни повітропроводів подачі повітря до пальників. Похибка розрахунку та експериментальних даних склала 8 %–12 %. При збільшенні сумарного q_3 на 40 %–60 % ці втрати компенсуються зменшенням абсолютного q_5 за рахунок підвищення потужності котла.

Список літератури

1. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast) // Official Journal of the European Union. – 2010. – L334. – 119 p. – URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj> (дата звернення 01.08.2021).
2. Bergström J. M. NO_x Reduction Using Reburning with Natural Gas / Jan Miljökonserterna Bergström. – 1993. – 43 С.
3. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best-Availed Techniques for Large Combustion Plants. July 2006. Institute for Prospective Technological Studies (Seville) – 942 p. – URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf
4. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику України : моногр. / І. А. Вольчин, Н. І. Дунаєвська, Л. С. Гапонич та ін. – Київ: ГНОЗІС, 2013. – 308 с. – ISBN 978-966-8840-97-5.
5. Логвинюк М. О. Підвищення надійності роботи котла, шляхом розподілення теплового навантаження по висоті топки / М. О. Логвинюк, Є. В. Новаківський // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2019. – № 4(58). – С. 42–47. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 1813-5420 (print). – ISSN 2308-7382 (on-line). – <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.207092>.
6. CO 153-34.02.304-2003 Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепло-

вых электростанций. – Москва: ОАО «ВТИ», 2005. – 42 с. – Введен 01.07.2003.

7. Шатиль А. А. Расчетное исследование топочных устройств / А. А. Шатиль. – Санкт-Петербург: ОАО «НПО ЦКТИ», 2003. – 150 с.

References (transliterated)

1. (2010), “Directive 2010/75 / EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (Recast)”, *Official Journal of the European Union*, L334, 119 p., Access mode: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj> (accessed 01 August 2021).
2. Bergström J. M. (1993), *NO_x Reduction using Reburning with Natural Gas*. 43 p.
3. Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC). Reference Document on Best-Availed Techniques for Large Combustion Plants. July 2006. Institute for Prospective Technological Studies (Seville) – 942 p. – URL: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/JRC_107769_LCPBref_2017.pdf
4. Volchyn I., Dunaevska N., Haponych L. et al. (2013), *Perspektyvy vprovadzhennja chystyh vugil'nyh tehnologij v energetyku Ukrainy* [Prospects for the introduction of clean coal technologies in the energy sector of Ukraine], GNOSIS, Kiev, 308 p., ISBN 978-966-8840-97-5.
5. Logvinyuk M. O., Novakivsky E. V. (2019), “Pidvyshhennja nadijnosti roboty kotla, shljahom rozpodilennja teplovogo navantazhennja po vysoti topky [Increasing the Reability of Work of Boilers by Equal Distribution of the Heat Load Over the Height of firebox]”, *Energetyka: ekonomika, tehnologii, ekologija* [POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology], no. 4(58), pp. 42–47, ISSN 1813-5420 (print), ISSN 2308-7382 (on-line), <https://doi.org/10.20535/1813-5420.4.2019.207092>.
6. (2005), *SO 153-34.02.304-2003 Metodicheskie ukazanie po raschetu vybrosov oksidov azota s dymovymi gazami kotlov teplovyh jelektrostantsij* [CO 153-34.02.304-2003 Methodical instructions for calculating emissions of nitrogen oxides with flue gases from the boiler of thermal power plants], OJSC “VTI”, Moscow, 42 p.
7. Shatil A. A. (2003), *Raschetnoe issledovanie topochnyh ustrojstv* [Calculation study of combustion devices], NPO “TsKTI”, Saint Petersburg, 153 p.

Надійшла (received) 08.08.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Логвинюк Максим Олександрович (Логвинюк Максим Александрович, Logvyniuk Maksym) – аспірант кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; тел.: 093-998-06-04; e-mail: mlogvinyuk@gmail.com.

Новаківський Євген Валерійович (Новаковський Евгений Валерьевич, Novakivskyi Yevhen) – кандидат технічних наук; доцент кафедри атомних електричних станцій і інженерної теплофізики, КПІ ім. Ігоря Сікорського; м. Київ; тел.: 073-100-98-18; e-mail: enovakivsky@gmail.com.