

К. С. ГОРБАНЬ, О. А. СІРИЙ, М. З. АБДУЛІН

МОЖЛИВОСТІ ВПЛИВУ СТРУМЕНЕВО-НИШОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ПАРАМЕТРИ ВОГНЕТЕХНІЧНОГО ОБ'ЄКТА

Енергетика це невід'ємна частина сучасного світу, яка має негативний вплив на навколишнє середовище. Зокрема спричиняє забруднення атмосфери шкідливими викидами як оксиди азоту та вуглецю. Застосування новітніх технологій спалювання та технологічних методів дозволяють знизити емісію NO_x та CO до європейських стандартів зі збереженням ефективності роботи вогнетехнічних об'єктів.

Ключові слова: теплоенергетика, спалювання газу, викиди, вогнетехнічний об'єкт, рециркуляція, оксиди азоту, оксиди вуглецю, пальник, струменево-нішова технологія.

К. С. ГОРБАНЬ, А. А. СИРЬИ, М. З. АБДУЛИН ВОЗМОЖНОСТИ ВЛИЯНИЯ СТРУЙНО-НИШЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОГNETEХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Энергетика это неотъемлемая часть современного мира, которая имеет негативное влияние на окружающую среду. В частности вызывает загрязнение атмосферы вредными выбросами как оксиды азота и углерода. Применение современных технологий сжигания и технологических методов позволяет снизить эмиссию NO_x и CO до европейских стандартов, сохраняя эффективность работы огнетехнического объекта.

Ключевые слова: теплоэнергетика, сжигание газа, выбросы, огнетехнический объект, рециркуляция, оксиды азота, оксиды углерода, горелка, струйно-нишевая технология.

К. HORBAN, O. SIRYI, M. ABDULIN JET-NICHE TECHNOLOGY INFLUENCE POTENTIAL ON THE ECONOMIC AND OPERATING PARAMETERS OF THE FIRE-ENGINEERING EQUIPMENT

The Power engineering is an inseparable part of the contemporary world that has a negative influence on the ecology; in particular it provokes the pollution of atmosphere with such harmful emissions as nitrogen and carbon oxides. Different methods are used to reduce the emission of harmful substances. The efficiency of such methods is increased when these are used in combination and not separately. The recirculation of flue gases and the use of contemporary technologies for municipal boilers, in particular jet-niche technology (JNT) enabled the reduction of NO_x and CO emissions to the levels that meet the requirements of European standards simultaneously improving the efficiency of the operation of the fire-engineering facility. The principle of operation of the JNT is based on the formation of the compact stable self-controlled vortex structure and on the interaction system of flammable and oncoming oxidizer flows. This technology enables the operation at minimum recirculation values and it means that all boiler parameters can be retained, in particular starting characteristic, combustion stability and unavailability of vibration modes including a high level of fuel burnout. The obtained research data showed that NO_x values were in the range of 80 to 140 mg/m^3 when the oxygen content at the furnace inlet was 20% and lower for different boiler systems (DKBR-10, KVGM-6.5, PTVM-50) at CO values close to 50 mg/m^2 . Hence, the use of the burners of a JNT type enables the reduction of NO_x emissions and retains the combustion process efficiency.

Key words: Heat power engineering, gas combustion, emissions, fire-engineering facility, recirculation, nitrogen oxides, carbon oxides, burner, and the jet-niche technology.

Вступ

Парадигма існування людства зазнає безповоротних змін, метою яких є забезпечення сучасників та майбутніх поколінь рівноцінно комфортними умовами життя. Така концепція сталого розвитку активно впроваджується у життя планети на всіх рівнях та в усіх напрямках життєдіяльності людини [1].

Енергетика, як результат еволюції і основний інструмент сучасного розвитку, має значний вплив на довкілля. Саме екологічні проблеми стали збудниками тривоги та активного впровадження нової концепції життя. Проте втілення в життя нових підходів до отримання енергії це процес, який вимагає значних часу та фінансів, а рішення і зміни людству необхідні вже сьогодні.

Одна з першочергових глобальних проблем це забруднення довкілля, а саме флори, фауни,

водних басейнів і повітря. Саме енергетичні та промислові підприємства постійно викидають сотні тисяч тон димових газів в атмосферу, компоненти яких призводять до кислотних дощів, сприяють глобальному потеплінню і шкодять здоров'ю. Оксиди азоту та вуглецю, які генеруються в процесі спалювання органічного палива у великих об'ємах.

На міжнародному та державному рівні актуальність питань впливу на екологічну ситуацію закріплена документально. Україна, як член Енергетичного Співтовариства, зобов'язана виконувати відповідні умови та дотримуватися європейських Директив 2001/80/ЄС та 2010/75/ЄС. Встановлена дуже жорстка норма, яка вимагає зниження поточних викидів у кілька разів. Тому на сьогоднішній день є чинним Національний план скорочення викидів (НПСВ).

© К. С. Горбань, О. А. Сірий, М. З. Абдулін, 2021

Мета роботи

В даній роботі представлені результати зниження викидів оксидів азоту при нормативних значеннях оксидів вуглецю за рахунок використання новітніх технологій спалювання природного газу та рециркуляції димових газів. Усі дані отримані практичним шляхом.

Виклад основного матеріалу

В наш час питанню шкоди довкіллю від діяльності енергетичних та промислових об'єктів приділяється багато уваги [2–4]. Причиною цьому є зв'язок з глобальними екологічними проблемами, які можуть призвести до знищення всього живого, в тому числі і людства. Наприклад, глобальне потепління, яке є результатом антропогенного впливу, в тому числі і енергетики, веде до зміни кліматичних умов і, як наслідок, зникнення деяких видів флори та фауни. Так, зростання температури довкілля на 1 °C веде до зсуву природних зон на 160 км. І вчені допускають, що температура може підвищитися на 3 °C, при цьому зміни в 2 °C буде достатньо для незворотних змін. Для розуміння темпів температурних змін за останні 100 років температура в Україні зросла на 0,7 °C, з яких близько 0,5 °C – за останні 15 років [5].

Температура відхідних газів при спалюванні органічного палива в котлах та інших вогнетехнічних об'єктах (ВО) може сягати 300 °C, що сприяє глобальному потеплінню і спричиняти теплове забруднення. Склад димових газів спричиняє також хімічне забруднення. З цієї точки зору природний газ є найбільш безпечним серед традиційних джерел енергії. Його склад в основному являє собою близько 98,5 % горючих вуглеводнів (98 % з яких метан CH_4), 1 % азоту N_2 і 0,15 % вуглекислого газу CO_2 , калорійність понад 8500 ккал/м³ (35,5 МДж/м³) [6]. Атмосферне повітря, яке подається в зону горіння як окисник, приблизно містить 78 % N_2 , 21 % O_2 кисню і 1 % інших компонентів. Отже, при спалюванні природного газу за котлом димові гази в основному містять вуглецеві CO_x та азотні NO_x оксиди.

Відповідно державним санітарним та будівельним нормам [7, 8] оксиди вуглецю та оксид азоту це компоненти відхідних газів енергетичних та промислових підприємств, які відносяться до шкідливих хімічних елементів і мають негативний вплив на здоров'я людини та екологію.

Згідно ресурсу [9] паливно-енергетичний комплекс є джерелом 36 % від загального обсягу забруднюючих викидів в Україні і CO_x та NO_x це одні з основних забрудників. Оксиди вуглецю (вуглекислий CO_2 та чадний CO гази) це безбарвні гази без запаху, впливають на нервову та серцево-судинну системи, викликають задуху та головний

біль. Токсичність зростає при наявності в повітрі азоту. Оксиди азоту (серед них монооксид NO та діоксид азоту NO_2) отруйний газ без запаху і кольору, викликає подразнення дихальних шляхів, у вологому середовищі утворює кислоти, що спричиняють набряк легень. Від так, згідно досліджень ВООЗ (Всесвітня організація охорони здоров'я), щороку від забрудненого повітря на планеті гинуть близько 2 млн. людей.

Процеси горіння та природу появи оксидів азоту вивчали Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовніков, І. Я. Сігал та ін. У їхніх роботах [10, 11] доводиться залежність NO_x від температури та наявності кисню в зоні горіння. Молекулярний азот досить інертний газ і розпадається при дуже високих температурах, які формуються в зоні горіння і сягають 2000 °C. Природний газ не так легко спалити, адже реакція горіння протікає в діапазоні 5 %–15 % пального в середовищі окисника при нормальній швидкості горіння близько 0,5 м/с [12]. Для забезпечення повного згорання палива повітря в топковий простір подається в надлишку, що характеризується відповідним коефіцієнтом надлишку повітря α і для газового палива в топці котла знаходиться в діапазоні 1,15–1,3. Важливу роль відіграє також організація топкового процесу та формування паливо-повітряної суміші, а саме розподіл пального в середовищі окисника.

Відомі різні методи боротьби з емісією NO_x , які також згадуються в НПСВ. Як зазначено в джерелі [13], хімічні методи очистки димових газів хоч і високо ефективні (нейтралізує 50 %–90 % NO_x), проте підвищує експлуатаційні затрати підприємства на 15 %–25 %, тому використовуються рідко. Більш доцільним є реалізація хімічних та технологічних підходів у комплексі. Так методи попередження утворення NO_x на стадії спалювання палива, серед яких стадійне спалювання, допалювання палива, подача пилу високої концентрації, технології з киплячим шаром, зниження навантаження котла, подача вологи в топковий простір, рециркуляція димових газів та оптимізація палика. Подібні заходи розглядаються першим етапом реалізації НПСВ. Для ВО, що працюють на газовому паливі застосовуються останні чотири. Проте зниження навантаження може призвести до значного підвищення капітальних затрат, а з введенням вологи ростуть втрати з відхідними газами. Метод рециркуляції димових газів ефективний для палива з низьким вмістом азоту і впливає утворення оксидів азоту в основному за рахунок зниження температури полум'я шляхом зниження концентрації кисню на вході в топку. При цьому важлива організація топкового процесу, яка визначається технологією спалювання.

Пальник загалом можна визначити як пристрій, що забезпечує отримання продуктів згорання необхідної якості шляхом формування відповідних

полів концентрацій, температур та швидкостей. Тому оптимізація ПП та використання новітніх технологій дозволяє не лише вплинути на емісію шкідливих речовин, а і регулювати ефективність процесу генерації енергії загалом за рахунок впливу на роботу ВО в цілому. Тобто реалізувати гідро-термо-хімічний підхід і регулювати процес на етапах підводу палива та окисника, реалізації спалювання паливної суміші та відводу продуктів згорання в оточуюче середовище [12].

Струменево-нішова технологія (СНТ) це сучасна технологія спалювання, яка розроблена на базі лабораторії горіння КПІ (Київський політехнічний інститут), дозволяє реалізувати цей підхід.

Принцип роботи СНТ базується на формуванні компактною стійкою саморегульованою вихрової структури, що виникає при взаємодії системи струменів пального в набігаючому потоці окисника з циркуляційною зоною за тілом поганого обтікання. На основі даної технології розроблені та впроваджені пальники СНТ. Більш детально технологія та пальник на її основі описаний в джерелі [12] та в інших роботах цього автора. На рис. 1 схематично зображений принцип роботи СНТ [12].

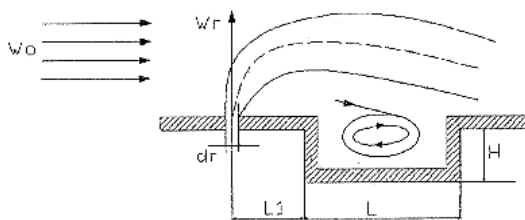


Рис. 1 – Принцип роботи струменево-нішової технології: W_0 – швидкість потоку окисника; W_r – швидкість виходу струменів газового пального; H, L, L_1, d_r – геометричні параметри ніші

Робочий процес ПП має тісний взаємозв'язок з усіма аспектами ефективності роботи ВО, включаючи екологічні. Таким чином застосування пальників типу СНТ дозволяє знизити емісію NO_x і зберегти ефективність топкового процесу [14].

Обговорення результатів

У цій роботі представлені результати впровадження комплексу методів зниження емісії NO_x . Застосовано рециркуляції димових газів на вхід повітря в пальник і модернізація котла пальниками СНТ.

Перші результати, як складова аспірантської роботи, були отримані на установках Рівненської котельні [14]. На котлах ДКВР-10 модернізованих ПП СНТ була організована рециркуляція та двофазне спалювання. В ході роботи за рахунок рециркуляції змінювався вміст кисню в зоні горіння. При зміні навантаження установки в діапазоні

60%–97%, за допомогою газоаналізатора типу «Testo331» були проведенні вимірювання газового складу продуктів згорання за котлом. При цьому в процесі експериментальних робіт підтримувалися приблизно на одному рівні коефіцієнт надлишку повітря та температура відхідних газів. Отримані дані представлені в таблиці 1. Нормативні значення згідно директив та НПСВ $NO_x = 100\text{--}200 \text{ мг/м}^3$, $CO = 35\text{--}100 \text{ мг/м}^3$.

Таблиця 1 – Результати модернізації ДКВР-10 з рециркуляцією та ПП СНТ

Вміст кисню на вході в топку O_2 , %	Емісія оксидів, мг/м^3	Відносна потужність N , %		
		60	79	97
21	NO_x	152	162	205
	CO	0	20	25
20	NO_x	113	125	131
	CO	13	25	40
19	NO_x	53	74	95
	CO	37	45	49

Аналіз отриманих даних і порівняння з нормативами показує, що модернізація дозволила забезпечити відповідність ВО сучасним стандартам екологічності. При цьому ефективність котла зростає на 18%, економія палива на 15% на часткових режимах, а також вдалося зекономити 40% електроенергії на приводи тяго-дугтьових установок за рахунок зменшення опору.

Також проводився уточнюючі та дублюючі експерименти проводилися на установці КВГМ-6,5, з застосуванням рециркуляції та СНТ.

Результати комплексних досліджень рециркуляції з використанням СНТ наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати комплексних досліджень рециркуляції з використанням СНТ

Рециркуляція, %	O_2 , %	NO_x , мг/м^3	CO, мг/м^3
3	20,5	175–205	25
6	20,1	145–165	40
9	19,7	120–140	50
12	19,3	100–112	55

Дослідження показали, що оксиди вуглецю залишалися в допустимих межах, температура на виході з котла підтримувалася на одному рівні, а значення шкідливих оксидів знаходилися у відповідності європейським нормам уже при 9%–10% рециркуляції. Для порівняння, у роботі [16] відсоток рециркуляції сягає 15%–20%. Така різниця в долі рециркуляції пояснюється рівномірним розподілом пального в паливній суміші, що реалізується СНТ. Дані дослідження дозволили зробити висновок, що відсоток рециркуляції залежить від технології спалювання. СНТ дозволяє забезпечити якість процесу горіння саме за рахунок розподілу палива в потоці окисника до горіння. Цей принцип дозволяє забезпечити максимальну ефективність

рециркуляції при її мінімальній долі як методу зниження емісії оксидів азоту. Чим нижче відсоток продуктів згорання на рециркуляцію, тим нижче рівень ефективного впливу на робочий процес ПП. Так, чим ближче рециркуляція до 20 %, тим менший діапазон регулювання потужності та стійкості горіння, полум'я лише займається і при будь-якому впливі гасне. Уже при рециркуляції 14 %–15 % рівень ефективності робочого процесу пального значно знижується і не відповідає сучасним.

Заміри здійснювалися при зміні навантаження від 37 % до 88 % від номіналу (саме цьому діапазону відповідають діапазони оксидів азоту у таблиці). При вихідних параметрах, тобто при 0 % рециркуляції, значення CO було близько 0 мг/м³, а NO_x знаходилися у діапазоні 200–250 мг/м³.

На сьогоднішній день проводяться дослідження рециркуляції з застосуванням СНТ на котлах ПТВМ-50. Проміжні результати показують, що модернізація дозволяє знизити вміст у відхідних газах NO_x нижче 100 мг/м³ при вмісті кисню 3 %.

Висновки

Для зниження викидів забруднюючих речовин від роботи вогнетехнічних об'єктів використовують різні методи та підходи. При роботі на природному газі найкраще проявили себе метод рециркуляції димових газів та оптимізація топкового процесу шляхом використання новітніх технологій. Рециркуляція дозволяє вплинути на емісію за рахунок зниження температури та активного кисню в ядрі горіння. Використання сучасних технологій спалювання забезпечує оптимізацію топкового процесу на етапі його організації (розподіл в топковому просторі, сумішеутворення, займання).

Струменево-нішова технологія дозволяє організувати топковий процес з мінімальними значеннями рециркуляції, а отже зберігати усі параметри котла, такі як пускові характеристики, стійкість горіння та відсутність вібраційних режимів, високий рівень вигорання палива (що підтверджується мінімальним вмістом CO у відхідних газах).

Дослідження, проведені на різних навантаженнях та з різним відсотком рециркуляції, показали залежність цього методу від технології спалювання пального, а також дозволили забезпечити значення викидів шкідливих речовин в межах актуальних європейських нормативів (NO_x = 100–200 мг/м³, CO = 35–100 мг/м³ при вмісті кисню 3 %) без погіршення робочого процесу ВО. Застосування технології СНТ на різних установках (ДКВР-10, КВГМ-6,5, ПТВМ-50) показали, що при вмісті кисню на вході в топкову камеру 20 % та нижче при значеннях CO близьких до 50 мг/м³ значення NO_x знаходилися в діапазоні 80–

140 мг/м³. Значне зниження витрат газу та електроенергії, а також покращення процесу горіння дозволяють позитивно вплинути на проблему глобального потепління шляхом зниження теплового забруднення від ВО.

Таким чином СНТ дозволяє впливати на роботу ВО комплексно, тим самим реалізуючи принцип концепції сталого розвитку. Можливості цієї технології продовжують вивчатися, що являє простір для подальших досліджень.

Список літератури

1. Сталий розвиток. – URL: <https://sd4ua.org/> (дата звернення: 14.02.2021).
2. Фіалко Н. М. Підвищення екологічної ефективності комплексних теплоутилізаторів систем котельних установок / Н. М. Фіалко, Р. О. Навродська, Г. О. Пресіч, Г. О. Гнедаш, С. І. Шевчук, О. В. Мартюк // Промислова теплотехніка. – 2018. – Т. 40, № 2. – С. 27–32. – ISSN 0204-3602. – DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.04>.
3. Басок Б. И. Повышение энергоэффективности экономики Украины – миссия и основной приоритет развития отечественной энергетики / Б. И. Басок, Е. Т. Базеев // Промислова теплотехніка. – 2017. – Т. 39, № 2. – С. 46–52. – ISSN 0204-3602. – DOI: <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.07>.
4. Жабо В. В. Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС / В. В. Жабо. – Москва: Энергоатомиздат, 2012. – 240 с.
5. Дідух Я. П. Екологічні аспекти глобальних змін клімату: причини, наслідки, дії / Я. П. Дідух // Вісник Національної академії наук України. – 2009. – № 2. – С. 34–44. – ISSN 0372-6436.
6. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – Изд. 3-е, перераб. и доп. – Санкт-Петербург: НПО ЦКТИ, 1998. – 257 с.
7. ДСП-201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць (від забруднення хімічними та біологічними речовинами). – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97#Text> (дата звернення: 14.02.2021).
8. Наказ 14.07.2020 №1596 Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#n16> (дата звернення: 14.02.2021).
9. Екологічні проблеми в Україні (участь в громадській оцінці національної екологічної політики). – URL: <https://www.zhiva-planeta.org.ua/pozicii-z-putan/168-pp.html> (дата звернення: 14.02.2021).
10. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садонович, Д. А. Фран-Каменцкий. – Москва: Академия наук СССР, 1947. – 147 с.
11. Сигал И. Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И. Я. Сигал. – Ленинград: Недра, 1988. – 312 с.
12. Абдулин М. З. Применение струйно-нишевой технологии сжигания топлива в энергетических установках / М. З. Абдулин // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2005. – № 6. – С. 130–144. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
13. Галкин С. В. Поиск пути снижения выбросов оксидов азота на ТОО «АЭС Согринская ТЭЦ» / С. В. Галкин, В. В. Заспасский. – URL: http://www.rusnauka.com/15_DNI_2008/Ecologia/33093.doc.html (дата звернення: 14.02.2021).
14. Абдулін М. З. Взаємозв'язок робочого процесу пальногового пристрою на основі струменево-нішової технології спалювання газу з екологічними аспектами роботи вогнетехнічних об'єктів / М. З. Абдулін, К. С. Горбань, О. А. Сірий // Теплофізика та теплоенергетика. – 2019. – Т. 41, № 3.

- С. 63–69. – ISSN 2663-7235. – DOI: <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.9>.
- Горбань К. С. Вплив на емісію оксидів азоту та вуглецю з використанням струменевано-нішової технології спалювання газоподібного палива у світлі концепції сталого розвитку / К. С. Горбань, М. З. Абдулін // Сталый розвиток – XXI століття: управління, технології, моделі. Дискусії : колективна монографія. – Київ, 2018. – С. 357–363. – Електронне видання. – ISBN 978-83-63649-17-3.
 - Кобзарь С. Г. Снижение выбросов оксидов азота в газовых котлах методом рециркуляции дымовых газов / С. Г. Кобзарь, А. А. Халатов // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 4. – С. 5–11. – ISSN 0204-3602.
- References (transliterated)**
- Stalyi rozvytok [Sustainable development], Access mode: <https://sd4ua.org/> (accessed 14 February 2021).
 - Fialko N. M., Navrodskaia R. A., Presich G. A., Gnedash G. A., Shevchuk S. I., Martiuk O. V. (2018), “Pidvyshchennia ekolohichnoi efektyvnosti kompleksnykh teploutylizatoriv system kotelnykh ustanovok [Increase of Ecological Effectiveness of Complex Heat-recovery Systems for Boiler Plants]”, *Promyslova teplotehnika* [Industrial heat engineering], vol. 40, no. 02, pp. 27–32, ISSN 0204-3602, <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2018.04>.
 - Basok B. I., Bazeev T. T. (2017), “Povyshenie energoeffektivnosti ekonomiki Ukrainy – missii i osnovnoi prioritet rozvittia otechestvennoi energetiki [Increase of Energy Efficiency of Ukraine’s Economy – mission and the Main Priority of Development of Native Energy]”, *Promyslova teplotehnika* [Industrial heat engineering], vol. 39, no. 02, pp. 46–52, ISSN 0204-3602, <https://doi.org/10.31472/ihe.2.2017.07>.
 - Zhabo V. V. (2012), *Ohrana okruzhaiushchei sredy na TES i AES* [Environmental protection at TPP and NPP], Energoatomizdat [Energoatomizdat], Moscow, Russian, 240 p.
 - Didukh Y. (2009), “Ekolohichni aspekty globalnykh zmin klimatu: prychny, naslidky, dii [Ecological Aspects of the Global Climate Changes: Reasons, Consequences and Actions]”, *Visnyk NAN Ukrainy* [Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine], no. 2, pp. 34–44, ISSN 0372-6436.
 - (1998), *Teplivoi rasschet kotlov (Normativnyi metod)* [Thermal calculation of boilers (Standard method)], NPO TsKTI [NPO CKTI], St. Petersburg, 257 p.
 - DSP-201-97. *Derzhavni sanitarni pravyla ohorony atmosferno-povitria naselenykh mist (vid zabrudnennia khimichnymy ta biolohichnymy rehovynamy)* [NSR-201-97. National sanitary rules of protection of atmospheric air of settlements (from pollution by chemical and biological substances)], Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0201282-97#Text> (accessed 14 February 2021).
 - Nakaz 14.07.2020 no 1596 pro zatverdzhennia gigiyenichnykh rehlamentiv dopustymoho vmistu khimichnykh ta biolohichnykh rehovyn u povitri robochoi zony* [Order 14.07.2020 No. 1596 on approval of hygienic regulations of permissible content of chemical and biological substances in the air of the working area], Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0741-20#n16> (accessed 14 February 2021).
 - Ekolohichni problem v Ukraini (uchast v hromadskii otsyntsi natsionalnoi ekolohichnoi polityky)* [Environmental issues in Ukraine (participation in public assessment of national environmental policy)], Access mode: <https://www.zhivaplaneta.org.ua/pozicii-z-putan/168-pp.html> (accessed 14 February 2021).
 - Zeldovich Ya. B., Sadovnikov P. Ya., Frank-Kamenetskii D. A. (1947), *Okislenie azota pri gorenii* [Oxidation of nitrogen during combustion], Akademiia nauk SSSR [Academy of Sciences of the USSR], Moscow, 147 p.
 - Sigal I. Ya. (1988), *Zashchita vozdushnoho basseina pri szhiganiu topliva* [Protection of the air basin during fuel combustion], Nedra [Subsoil], Leningrad, Russia, 312 p.
 - Abduln M. Z. (2005), “Promeneniie struino-nishevoi tehnologii szhiganiia topliva v energeticheskikh ustanovkakh [Using the Jet-Niche Technology for the Fuel Combustion in Power –Generating Plants]”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 6, pp. 130–144, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line).
 - Galkin S. V., Zapasnyi V. V. (2008), *Poisk puti snizhenia vybrosov oksidov asota na TOO “AES Sogrin’skaia TETS”* [Search for a way to reduce nitrogen oxide emissions at NPP Sogrin’skaia CHPP LLP], Access mode: https://www.rusnauka.com/15_DNI_2008/Ecologia/33093.doc.html (accessed 14 February 2021).
 - Abduln M. Z., Horban K. S., Siryi O. A. (2019), “Vzaemoviazok robochoho protsesu palnykovoho prystroiu na osnovi strumenevo-nishevoi tehnologii spaliuvannia gasu z ekolohichnymy aspektamy robotu vohnetehnichnykh ob’ektiv [Interrelation of working process of the burnet device based on stream-niche technology of gas burning with environmental aspects of fireengineering object work]”, *Teplofizyka ta teploenergetyka* [Thermophysics and Thermal Power Engineering], vol. 41, no. 3, pp. 63–69, ISSN 2663-7235, <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2019.9>.
 - Horban K. S., Abduln M. Z. (2018), “Vplyv na emisiu oksydiv azotu ta vuhletsiu z vykorystanniam strumenevo-nishevoi tehnologii spaliuvannia gasovoho palyva u svitli konseptsii staloho rozvytku [Impact on the emission of nitrogen oxides and carbon using stream-niche combustion technology of gaseous fuel in the light of the concept of sustainable development]”, *Stalyi rozvytok – XXI storichcha: upravlinnia, tehnologii, modeli : kolektyvna elektronna monografia* [Sustainable development – XXI century: management, technology, models : collective electronic monograph], pp. 357–363, ISBN 978-83-63649-17-3.
 - Kobzar S. G., Khalatov A. A. (2009), “Snizheniie vybrosov oksidov azota v gazovykh kotlah metodomdretsirkulatsii dymodyh gazov [The Nitrogen Oxides Reduction in Gas Boilers by a Flue Gas Recirculation Method]”, *Promyslova teplotehnika* [Industrial heat engineering], vol. 31, no. 4, pp. 5–11, ISSN 0204-3602.

Надійшла (received) 24.03.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Горбань Катерина Сергіївна (Горбань Катерина Сергеевна, Horban Kateryna Serhiivna) – аспірантка, КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: 097-359-17-95; e-mail: katy.s.g@ukr.net.

Сірий Олександр Анатолійович (Сирый Александр Анатоліевич, Siryi Oleksandr Anatoliiovych) – науковий співробітник, старший викладач, КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: 097-926-50-52; e-mail: seruy_alex@i.ua.

Абдулін Михайло Загредінович (Абдулин Михаил Загредінович, Abdulin Myhailo Zahretdynovych) – доктор технічних наук, професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій; м. Київ; тел.: 050-462-75-52; e-mail: mzabduln@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9317-3979>.