

О. В. ЄФІМОВ, П. В. ЛІФШИЦЬ, В. Л. КАВЕРЦЕВ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В ТЕПЛОВИХ УСТАНОВКАХ МЕТАЛУРГІЙНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою даної статті є представлення засобів щодо підвищення адиабатичної температури горіння палива, що подається в пальник для підігріву повітрянагрівача металургійних підприємств та скорочення використання природного газу. Представлені три види засобів підвищення адиабатичної температури горіння палива у вигляді технологічних схеми подачі палива в пальник. Проведено стислий аналіз усіх видів схем. Проаналізовано їх переваги та недоліки.

Ключові слова: технологічна схема, доменний газ, природний газ, підігрів повітря, адиабатична температура.

O. EFIMOV, P. LIFSHYTS, V. KAVERTSEV

IMPROVING THE TECHNOLOGY FLOWCHART FOR GAS COMBUSTION IN THERMAL UNITS OF METALLURGY PLANTS

This scientific paper gives consideration to several options of technology flowcharts used for the organization of the air heating process in the air heaters (cowpers) of blast furnaces at metallurgy plants. Combustion products, in particular the mixture of furnace gas with air serve as a source of heat for air heating. To provide stable blast furnace gas combustion, and at the same time an increase in the adiabatic combustion temperature, natural gas is supplied to the burner installed in the air heater. The task is to ensure an appropriate gas combustion process quality, namely to achieve a maximum (adiabatic) temperature of the combustion products with a full or partial reduction in natural gas consumption. However, it should be noted that the use of natural gas in this case, even in relatively small amounts, is an expensive approach. Therefore, it is desirable to reduce the natural gas consumption to a minimum solving at the same time the problems relating to an increase in the adiabatic combustion temperature. One of the ways to solve this problem is the use of an appropriate flowchart for heating air and blast furnace gas that are simultaneously fed into the burner. However, the improvement of such a flowchart may result in the most effective solution of formulated problems. The essence of such a flowchart consists in that an increase in the adiabatic temperature of combustion products is achieved due to the use of heated, oxygen-enriched gas mixtures. For this purpose, the flowchart includes an intermediate burner and an air separation unit. The flowcharts proposed for the organization of the air heating process in the air heaters (cowpers) of blast furnaces at metallurgy plants are presented in this scientific paper.

Key words: technological flowchart, blast furnace gas, natural gas, air heating, and adiabatic temperature.

Вступ

Підвищення енергоефективності доменного виробництва призводить до зниження собівартості виробництва чавуну та підвищення конкурентоспроможності готової металургійної продукції, а також сприяє як безпосередньо, так і опосередковано зменшенню шкідливих викидів в атмосферу. Ці питання можна вирішувати, збільшуючи температуру під куполом повітрянагрівачів доменних печей (кауперів), знижуючи питому витрату коксу за рахунок збільшення температури дуття, зменшуючи матеріаломісткість і капітальні витрати на нагрівання доменного дуття шляхом модернізації або будівництва нових повітропідігрівачів.

Мета роботи

Метою даної статті є проведення аналізу існуючих методів та підходів щодо поліпшення якості процесу нагріву повітря в повітрянагрівачах доменних печей (кауперів), а саме підвищенню ефективності роботи металургійних підприємств. Визначення напрямків щодо вибору оптимального засобу щодо організації процесу підігріву повітря в повітропідігрівачах (кауперах) доменних печей металургійних підприємств.

Викладення основного матеріалу

Питанням щодо використання газового палива для технологічного процесу на металургійних підприємствах, особливо доменного та природного газу, а саме процесу підігріву повітря в повітропідігрівачах (кауперах) доменних печей, приділяється велика увага [1] – [6].

Процес нагрівання доменного дуття потребує особливого підходу щодо вирішення проблем від проектування повітрянагрівачів до їх експлуатації. При вдосконаленні режимів спалювання палива необхідно розглядати питання як вивільнення природного газу, так і підвищення стійкості кладки та зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Збільшення кампанії повітрянагрівачів призводить не тільки до зменшення інвестицій, але і до економії коксу, оскільки при передчасній зупинці на ремонт одного з 4-х повітрянагрівачів спостерігається зниження температури дуття на 50 °С – 80 °С, що призводить до збільшення питомої витрати коксу на 8 – 10 кг/т.

Для забезпечення температури дуття 1150 °С – 1250 °С рівень теплоти згорання доменного газу є недостатнім, тому його зазвичай збагачують природним газом у кількості, що відповідає 15 – 20 млн. м³ на рік для доменної печі обсягом 1513 м³. У той же час теплота відпрацьованих газів не використовується, що призводить до перевитрати палива.

Відомо, що капітальні витрати на збільшення енергоефективності у 3–4 рази менші за витрати на виробництво енергоносіїв. Тому заощадження енергоресурсів для України є пріоритетним напрямом, одним із важливих факторів забезпечення конкурентоспроможності продукції на світовому ринку.

Економія енергетичних і матеріальних ресурсів забезпечує як економічний ефект, а й покращує екологічну обстановку промислових зон. Зменшення витрати палива пропорційно знижує викиди шкідливих речовин, споживання кисню і виділення теплоти в навколишнє середовище. При цьому покращується екологічна ситуація у місцях видобутку палива, сировини, а також на вогнетривких заводах [3]–[5].

Температура дуття, що нагрівається, на виході з повітрянагрівача змінна: на початку періоду охолодження насадкі вона максимальна і практично дорівнює температурі продуктів згоряння на вході в насадку, а потім зменшується і в кінці нагрівання вона знижується на 150 °С–200 °С. Для підтримки постійної температури дуття, що надходить до доменну піч, використовують автоматичну систему, в якій застосовують підмішування частини холодного дуття до гарячого. Витрата дуття, що проходить через насадку, змінний і він регулюється за допомогою змішувального клапана, який частина дуття від загальної витрати пропускає, минаючи насадку, і підмішує до гарячого дуття, знижуючи тим самим його температуру до заданого рівня. Датчиком служить термопара, встановлена у повітропроводі гарячого дуття.

Такий спосіб регулювання температури гарячого дуття неефективний, оскільки його температура стабілізується на рівні мінімального значення, яке має місце наприкінці дутьового періоду. За наявності чотирьох повітрянагрівачів у блоці печі для стабілізації температури гарячого дуття можна використовувати попарно-паралельний режим роботи повітрянагрівачів. У цьому випадку на дутті знаходяться два апарати та їх тривалість дуття зміщена на півперіоду. Тому при змішуванні двох більш і менш нагрітих потоків дуття відбувається стабілізація температури загальної витрати дуття.

Забезпечення попарно-паралельного режиму роботи повітрянагрівачів викликає певні труднощі, інколи ж неможливо його здійснити. Це пов'язано з тим, що необхідно спалювати збільшену кількість газу (приблизно в 1,5 рази), передбачити заходи, пов'язані зі збільшенням тиску газу та повітря горіння перед пальником (у 2,0–2,5 рази), встановити клапани для автоматичного регулювання витрати холодного дуття у кожного повітрянагрівача.

Тривалість періоду дуття при послідовному режимі роботи повітрянагрівачів становить

$$T_0 = (n - 1) \cdot T_n,$$

а при попарно-паралельному –

$$T_0 = T_n,$$

де n – кількість повітрянагрівачів в блоці печі;
 T_n – тривалість періоду нагрівання.

Повітрянагрівачі опалюють доменним газом, а коли його теплота згоряння не забезпечує задану температуру під куполом, то його збагачують природним газом (2,5 %–4,5 % об.) або ж підігрівують доменний газ і вентиляторне повітря [3]–[5].

Пропонується розглянути кілька варіантів технологічних схем підігріву повітря в повітропідігрівачі (каупері) доменної печі. Джерелом тепла для підігріву повітря є продукти згоряння (доменного газу з повітрям). Завдання полягає у забезпеченні максимальної (адіабатичної) температури продуктів згоряння за повного або часткового скорочення витрати природного газу.

Для забезпечення стійкого горіння доменного газу, і в той же час підвищення адіабатичної температури горіння, в пальниковий пристрій (який встановлено в повітропідігрівачі) подається природний газ (рис. 1).

Тут агенти для забезпечення горіння (доменний газ, повітря, природний газ) подаються по своїх окремих каналах в пальниковий пристрій, яке встановлено в каупері. В даному випадку, використання природного газу, навіть у відносно малих кількостях, є витратним. Тому бажано було б скоротити до мінімуму витрату природного газу та одночасно вирішити задачу, пов'язану з підвищенням адіабатичної температури горіння.

Одним із способів вирішення задачі скорочення до мінімуму витрати природного газу може бути використання технологічної схеми з попереднім підігрівом повітря та доменного газу, які одночасно подаються в пальник.

Джерелом тепла для підігріву є димові гази (гази, що йдуть) (рис. 2). Тут частина повітря і доменного газу підігрівуються в підігрівачах і змішуються з основними потоками, відповідно, повітря та доменного газу.

Надійність і безперебійність роботи цієї схеми забезпечує байпасна лінія, яка може бути використана в різних режимах (пусковий режим, при ремонтах або пошкодження підігрівачів і та ін.).

До переваг даної схеми можна віднести те, що одночасно із забезпеченням можливості невикористання природного газу, підвищується адіабатична температура продуктів згоряння і знижується температура газів. У той же час ця схема недостатньо ефективна в силу того, що підігрів робочих тіл (повітря та доменного газу) обмежений температурою димових газів, пропускною здатністю теплообмінника (це обмежує можливість збільшення витрати доменного газу та повітря на підігрів) та ін. Крім того Однак на ДП-2 МК «Запоріжсталь» повітряний теплообмінник через 3,5 роки вийшов із експлуатації.

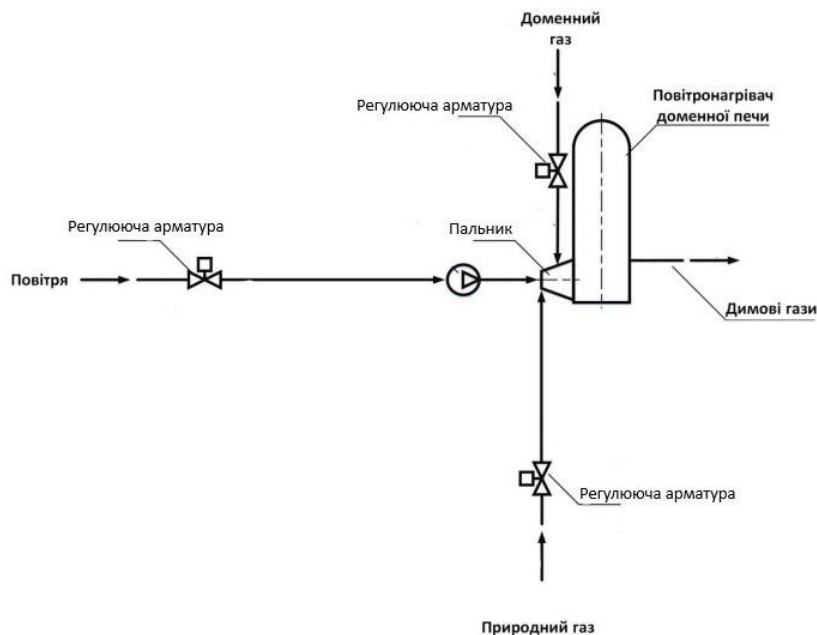


Рис. 1—Існуючий варіант технологічної схеми організації спалювання газу для підігріву повітря в повітропідігрівачі доменної печі (каупері)

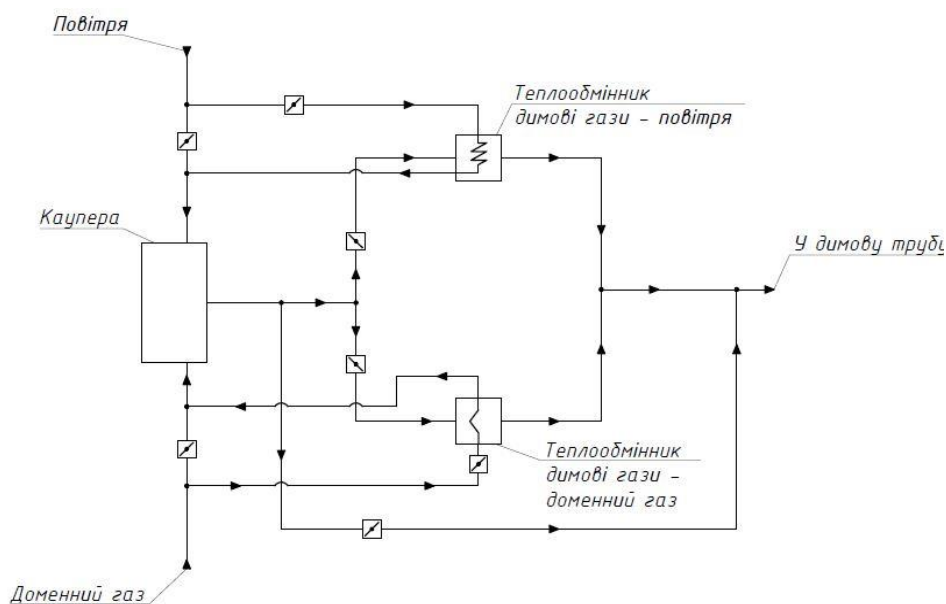


Рис. 2— Варіант технологічної схеми організації спалювання газу для підігріву повітря в повітропідігрівачі доменної печі (каупері) з попереднім підігрівом повітря та доменного газу, які одночасно подаються в пальник

Було встановлено, що основною причиною руйнування була низькотемпературна сірчано-кислотна корозія, яка утворюється при температурі відпрацьованих димових газів з теплообмінників нижче температури точки роси сірчаної кислоти ($120\text{ }^{\circ}\text{C} - 130\text{ }^{\circ}\text{C}$). Слід зазначити, що при існуючій системі теплообмінників в осінньо-зимовий період, коли температура повітря нижче $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, усунути

корозію неможливо, оскільки холодне повітря, зустрічаючись з трубчаткою, яку омивають димові гази з температурою на виході теплообмінника $150\text{ }^{\circ}\text{C} - 170\text{ }^{\circ}\text{C}$, різко охолоджує труби до температури нижче $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3].

Визначено оптимальний режим роботи цього варіанта технологічної схеми (табл. 1).

Таблиця 1 – Показники оптимального режиму роботи технологічної схеми організації спалювання газу для підігріву повітря в повітропідігрівачі доменної печі (каупері) з попереднім підігрівом повітря та доменного газу, які одночасно подаються в пальник

Витрата димових газів від кауперів, $\text{м}^3/\text{год}$	176500
Витрата повітря, $\text{м}^3/\text{год}$	75360
Витрата доменного газу, $\text{м}^3/\text{год}$	106200
Температура димових газів на виході з кауперів, $^{\circ}\text{C}$	260
Температура доменного газу після підігрівача, $^{\circ}\text{C}$	180
Температура повітря після підігрівача, $^{\circ}\text{C}$	180

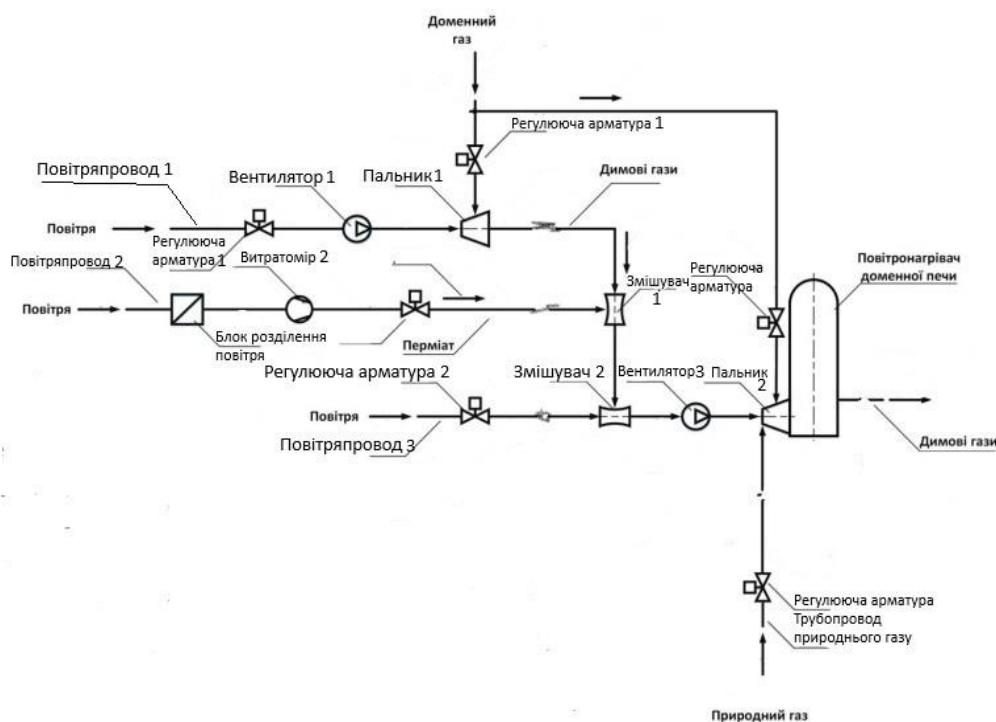


Рис. 3–Технологічна схема щодо підвищення адиабатичної температури продуктів згоряння з використанням підігрітих, збагаченим киснем, сумішей газів та установкою поділу повітря

Найбільш ефективним рішенням поставлених завдань може бути удосконалення існуючої схеми (рис. 1). Суть такої схеми (рис. 3) полягає в тому, що підвищення адиабатичної температури продуктів згоряння досягається за рахунок використання підігрітих, збагаченим киснем, сумішей газів. Для цього у схемі передбачено проміжний пальник та установка поділу повітря.

Представлена технологічна схема (рис. 3) забезпечує значне підвищення адиабатичної температури продуктів згоряння та економію витрати природного газу. Тут повітря одночасно подається з трьох точок (за трьома повітряпроводами).

Повітря з першої точки (повітряпровід 1) за допомогою дутьового вентилятора 1 подається на проміжний пальник 1. Одночасно туди ж подається частина доменного газу (решта доменного газу крокує в пальник 2). Димові газі (продукти згоряння), що утворюються у разі спалювання у пальнику 1 потрапляють у змішувач 1. Повітря з другої точки (повітряпровід 2) надходить у блок

розділу повітря і утворений там перміат (повітря збагачене киснем) надходить у змішувач 1 де змішується з продуктами з димовими газами (продуктами спалювання доменного газу в пальнику 1). Повітря з третьої точки (повітряпровід 3) подається до змішувача 2. Тут він змішується із сумішшю (перміат – продукти згоряння від проміжного пальника 2) і утворена суміш газопроводом подається в основний пальник 2, що встановлено в каупері. Одночасно в пальник 2 подається природний газ та доменний газ. За такої схеми витрата газу значно скорочується у порівнянні з вже наведеними схемами (рис. 1, 2).

Надалі таку технологічну схему з поділом повітря можна використовувати і для котельних агрегатів, встановлених на металургійних підприємствах, які працюють на різних видах газоподібного палива.

Висновки

Нагрівання доменного дуття потребує особливого підходу щодо вирішення проблем від проектування повітрянагрівачів до їх експлуатації. При вдосконаленні режимів спалювання палива необхідно розглядати питання як вивільнення природного газу, так і зниження шкідливих викидів у навколишнє середовище. Завдання полягає у забезпеченні максимальної (адіабатичної) температури продуктів згорання за повного або часткового скорочення витрати природного газу.

Одним із способів вирішення задачі скорочення до мінімуму витрата природного газу може бути використання технологічної схеми з попереднім підігрівом повітря та доменного газу. Однак, враховуючи недоліки такого засобу оптимальним рішенням є використання технологічної схеми зі збагаченням киснем, сумішей газів. Для цього у схемі передбачено проміжний паливник та установка поділу повітря. Використання такої схеми дозволить, не змінюючи існуючий технологічний цикл виробництва чавуну, скоротити витрату газу. скоротити витрату коксу під час виробництва чавуну до 7 кг/т.

Список літератури

1. Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных / Под. ред. А. В. Ефимова. – Харків : Підручник НТУ «ХП», 2013. – 409 с.
2. Каверцев, В. Л. Обзор проблем эффективного использования паливно-енергетичних ресурсів в промисловому секторі України та можливі оптимальні шляхи їх вирішення / В. Л. Каверцев, В. О. Дягілев // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2017. – № 10(1232). – С. 92–96. – Бібліогр.: 4 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.10.13>.
3. Грес Л. П. Теплообменники доменных печей [Текст] : моногр. / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. Е. Миленина ; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Л. П. Греса. – Дніпропетровськ : Пороги, 2012. – 491 с. – ISBN 978-617-518-207-9.
4. Грес Л. П. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья на эксплуатируемых доменных печах путем установки системы теплообменников для нагрева компо-

нентов горения и модернизации воздухонагревателей / Л. П. Грес, Е. А. Каракаш, С. А. Карпенко, С. В. Колдомасов // Метал та лиття України. – 2014. – № 5–6(252–253). – С. 43–47. – ISSN 2077-1304 (print). – ISSN 2706-5529 (on-line).

5. Грес Л. П. Повышение энергоэффективности нагрева доменного дутья : моногр. / Л. П. Грес, С. А. Карпенко, А. А. Науменко, В. П. Івашенко, А. О. Еремін, Е. А. Каракаш, Е. В. Гупало / под общей ред. д.т.н., проф. Л. П. Греса. – Днепр, 2021. – 612 с. – ISBN 978-617-518-207-9.
6. Єфімов О. В. Аналіз двохступеневого спалювання палива в мультипаливних котлах / О. В. Єфімов, В. Л. Каверцев, В. О. Дягілев, Т. А. Гаркуша, Б. Б. Черниш // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2021. – № 1(5). – С. 33–37. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2078-774X (print). – ISSN 2707-7543 (on-line). – DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.01.06>.

References (transliterated)

1. Efimova A. V. (ed.) (2013), *Sovershenstvovanie i optimizaciya modelej, processov, konstrukcij i rezhimov raboty e'nergeticheskogo obo-rudovaniya AЕ'S, ТЕ'S i otopitel'nyx kotel'nyx* [Improvement and optimization of models, processes, constructions and modes of operation of energy equipment of NPPs, TPPs and heating boilers], NTU "KhPI", Kharkov, 409 p.
2. Kavertsev, V. and Dyaghilev, V. (2017), "Reviewing an Efficiency of the Use of Fuel and Power Resources for the Industry of Ukraine", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 10(1232), pp. 92–96, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2017.10.13>.
3. Gres L. P. (2012), *Teploobmenniki domennyx pechej* [Heat exchangers of blast furnaces], Porogy', Dnipropetrovsk, 491 p, ISBN 978-617-518-207-9.
4. Gres L. P., Karakash E. A., Karpenko S. A., Koldomasov S. V. (2014), "Increase energy heating blast air at the operated blast furnaces by installing a heat exchanger to heat the component to burning and modernization of the heater", *Metal and casting of Ukraine*, no. 5–6(252–253), pp. 43–47, ISSN 2077-1304 (print), ISSN 2706-5529 (on-line).
5. Gres L. P., Karpenko S. A., Naumenko A. A., Ivashchenko V. P., Eremin A. O., Karakash E. A., Gupalo E. V. (2021), *Povyshenie e'nergoe'fektivnosti nagreva domennogo dut'ya* [Increasing the energy efficiency of blast furnace heating], Dnepr, 612 p, ISBN 978-617-518-207-9.
6. Efimov O., Kavertsev V., Dyahiliev V., Garkusha T., Chernysh B. (2021), "Analysis of Two-Stage Fuel Combustion in Multi-Fuel Boilers", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, no. 1(5), pp. 33–37, ISSN 2078-774X (print), ISSN 2707-7543 (on-line), <https://doi.org/10.20998/2078-774X.2021.01.06>.

Надійшла (received) 12.12.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Єфімов Олександр Вячеславович (Efimov Olexander) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: AVEfimov22@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3300-7447>.

Ліфшиць Петро Володимирович (Lifshyts Petro) – аспірант кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: lifshyts.p@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9042-2513>.

Каверцев Валерій Леонідович (Kavertsev Valerii) – кандидат технічних наук, доцент кафедри парогенераторобудування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; e-mail: kaverseff@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9472-1658>.