

I. А. НАЗАРЕНКО, О. А. ПЕТРИК, А. А. КУЗЬМЕНКО, А. О. ЛУЦЕНКО

АНАЛІЗ ЯКОСТІ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ ОПАЛЕННЯ НАГРІВАЛЬНИХ КОЛОДЯЗІВ

У роботі досліджено ефективність нагрівання злитків з легованої сталі у рекуперативних нагрівальних колодязях з опаленням з центру поду при безперервному та імпульсному способі подачі палива. Виявлено, що особливістю теплової роботи колодязів з опаленням з центру поду полягає у вертикальному розташуванні факела і нерівномірному тепловиділенні по висоті робочої камери печі, що призводить до нерівномірного нагрівання злитків металу. Аналіз літературних джерел показав, що нагрівання високолегованих та спеціальних сталей відрізняється тривалою витримкою та підвищеними витратами палива, тому інформація про розподіл температури в злитках дуже важлива для розробки раціональних температурних режимів їх нагрівання. Представлено результати термометрування дослідного злитку при його нагріванні у складі садки високолегованих сталей. Встановлено кінцевий перепад температури в злитку та характер її зміни у процесі витримки металу. Кінцевий перепад температур в дослідному злитку визначається нерівномірністю температурного поля нагрівального колодязю та складає 80 °С – 120 °С. Встановлено, що температура підігрівання повітря в керамічному рекуператорі в процесі нагрівання садки металу при безперервному способі змінюється в середньому від 400 °С до 600 °С, що є значно нижче за паспортні дані. Використання результатів досліджень дозволяє розробити режими нагрівання нержавіючих марок сталі з скороченим періодом витримування. Виявлено значні конструктивні недоліки колодязів, що впливають на рівномірність нагрівання металу, питому витрату палива та рівень експлуатаційних витрат. Досліджено ефективність впровадження імпульсної подачі палива для нагрівальних колодязів з опаленням з центру поду. Доведено, що застосування імпульсного способу подавання палива в період витримки дозволить інтенсифікувати теплообмінні процеси та разом з цим підвищити рівномірність нагрівання злитків.

Ключові слова: нагрівальний колодязь, імпульсне опалення, високолеговані сталі, температурний режим, температурне поле.

I. NAZARENKO, O. PETRYK, A. KUZMENKO, A. LUTSENKO ANALYZING THE QUALITY OF METAL HEATING FOR VARIOUS METHODS OF WARMING – UP THE HEATING WELLS

This research was done to analyze the heating efficiency of alloy steel ingots in recuperative heating wells with heating from the hearth center using continuous and pulsed fuel supply methods. It was revealed that the peculiarity of the thermal operation of wells with heating from the hearth center is the vertical location of the torch and uneven heat release along the height of the working chamber of the furnace that results in the nonuniform heating of metal ingots. An analysis of literature sources showed that the heating of highly alloyed and special steels is characterized by long holding times and increased fuel consumption; therefore information on the temperature distribution in ingots is very important for the development of rational temperature modes for their heating. The results of thermometry of an experimental ingot heated within the volume of high-alloy steels have been given. The final temperature differences in the ingot and the pattern of a change during the metal holding process have been established. The final temperature difference in the test ingot is determined by the nonuniformity of the temperature field of the heating well and it is in the range of 80 °C to 120 °C. It has been established that the temperature of air heating in a ceramic recuperator during the heating of a metal volume using a continuous method varies on average from 400 °C to 600 °C, which is significantly lower than the passport data. The use of the obtained research data makes it possible to develop heating modes for stainless steel grades with a shortened holding period. Significant design flaws of wells that affect the uniformity of metal heating, specific fuel consumption and the level of operating costs have been identified. The effectiveness of introducing pulsed fuel supply for heating wells with heating from the hearth center has been studied. It has been proven that the use of a pulsed method of fuel supply during the holding period will intensify heat exchange processes and increase the ingot heating uniformity.

Key words: heating well, pulse, highly alloyed steels, temperature mode and temperature field.

Вступ

Прогрівання злитків у нагрівальних колодязях в більшості визначає якість прокату, що виробляється та роботу стану в цілому. Інформація про розподіл температур за перерізом у злитках дуже важлива для розробки раціональних температурних режимів нагрівання високоякісного металу перед прокаткою.

Для вітчизняної металургії усереднені показники енерго- та ресурсозбереження процесів теплової обробки заготовок значно нижче, ніж у західних аналогів. Так, усереднені питомі витрати умовного палива для виробництва одиниці прокату для української металургії становить 115 – 125 кг у.п./т, що в 2 – 4 рази перевищує аналогічні показники провідних іноземних підприємств. Таким чином, розвиток наукових основ ефективного

керування теплотехнічними процесами систем виробництва заготовки і її раціональної теплової обробки є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої дозволить досягти високого рівня конкурентоспроможності вітчизняної продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

Особливістю теплової роботи колодязів з опаленням з центру поду полягає у вертикальному розташуванні факела і нерівномірному тепловиділенні по висоті робочої камери печі, що призводить до нерівномірного нагрівання злитків металу. Підвищення якості нагрівання металу особливо важливе для підприємств, де виробляються високолеговані і спеціальні сталі. Нагрівання такого металу відрізняється тривалою витримкою та підвищеними витратами палива, тому інформація про розподіл температури в злитках дуже важлива для розробки раціональних температурних режимів їх

© I. А. Назаренко, О. А. Петрик, А. А. Кузьменко, А. О. Луценко, 2023

нагрівання [1] – [4].

Важливою стратегією також є перехід до ресурсозберігаючих та безвідходних технологій. Якість нагрітого металу визначається його кінцевим температурним станом. Дослідження температурного поля злитків, що нагріваються в колодязях, пов'язане зі значними труднощами, чим пояснюється невелика кількість публікацій, присвячених, в основному, нагріванню злитків рядових марок сталі [5].

Мета роботи

Поставлене завдання може бути сформульоване таким чином: з урахуванням марки сталі, маси садки і початкового теплового стану металу необхідно оцінити кінцевий перепад температури у злитках нержавіючих марок сталі, що нагріваються у рекуперативному нагрівальному колодязі з опаленням з центра поду при імпульсній подачі палива в період витримки та порівняти перепад температур отриманий при безперервному способі подачі палива. Тобто метою роботи є порівняння результатів дослідження імпульсного та безперервного способів подачі палива для підвищення якості нагріву легованих сталей у нагрівальних колодязях.

Виклад основного матеріалу

Досліджувані колодязі опалюються природньо-доменною сумішшю з теплою згорання 6,7 МДж/м³. Розміри робочої камери 4,8×4,6 м, висота 3,0 м. Контроль температури печі здійснюється за показаннями потенціометра на щиті контрольно-вимірювальних приладів, на який надходить сигнал з термоелектричного термометра, встановленого у верхній частині робочої камери.

У процесі підготовки до досліджень було виготовлено злиток з нержавіючої сталі з отворами. Маса злитка – 3,5 т. У бічній стіні колодязя під час ремонту виконали прорізи, через які у дослідний злиток вводилися термоелектричні термометри. Під час дослідження прорізи герметизували.

У дослідних нагріваннях злиток з отворами встановлювали поруч з пічною термопарою, температура у злитку контролювалася у семи точках: у верхньому перерізі – дві, у середньому – три, у нижньому – дві (див. рис. 1). Замірювання температури виконували хромель алюмельові термоелектричними термометрами у комплекті з багаточковим потенціометром.

Також було встановлено термоелектричні термометри до і після керамічного рекуператора на димовій стороні і перед пальником у горизонтальному каналі підігрітого повітря.

Дослідний злиток нагрівали разом з технологічними злитками подібної марки сталі такої ж ваги і форми. Нагрівання проводили одразу після

ремонту нагрівального колодязя. Результати експериментальних досліджень при безперервному способі подачі палива представлено на рис. 2.

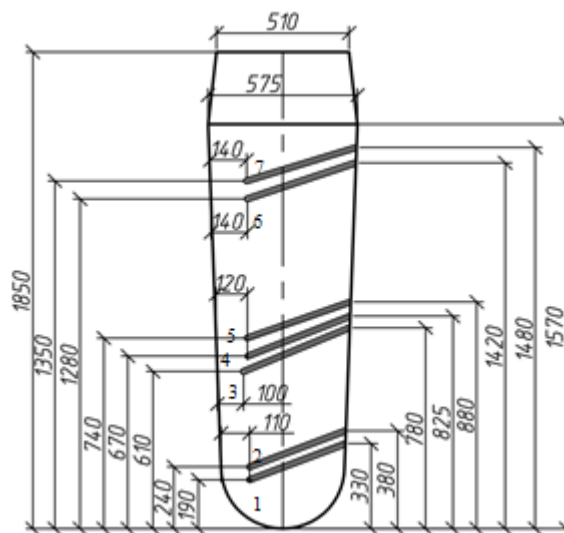


Рис. 1 – Схема розташування точок вимірювання температури у дослідному злитку

На графіку (див. рис. 2) цифрами позначено дані термопар, які розташовано у дослідному злитку за схемою, що показана на рис. 1. На рис. 2 представлено результати вимірювання температури печі та контрольних точок у дослідному злитку при нагріванні сталі 08X18H10T при безперервному нагріванні.

Відповідно до чинної технологічної інструкції режим нагрівання нержавіючих марок сталі включає:

- 1) підйом до температури томління 1180 °С;
- 2) витримування при 1180 °С протягом 1 – 8 годин (тривалість визначається пластичністю металу і температурою садження злитків);
- 3) підйом до температури томління 1240 °С для пластичного або 1220 °С для малопластичного металу і металу з особливо низькою пластичністю;
- 4) витримування при цій температурі протягом 3 – 5 годин.

На початковому етапі підвищення температури теплова потужність поступово зростає. Далі процес нагрівання відбувається при максимальних витратах газу. Такий режим встановлено з урахуванням температури «холодного посаду» та марки технологічного металу, що нагрівається, – сталь 08X18H10T. Вага садки 67,6 т.

У дослідному злитку на початок процесу нагрівання температура була вищою у грані, що обернена до кладки (точки 2, 5, 7).

На завершальному етапі максимальна температура була у грані, що обернена до факелу (точки 1, 3, 6). Центральна точка 4 набула у кінці нагрівання проміжного положення.

Внаслідок теплової інерційності температура у злитку не може у кінці нагрівання знизитися також різко, як і температура печі – з 1320 °C до 1260 °C. У верхньому та середньому перерізах злитку перепади температур були не значними 20 °C – 30 °C, однак істотно низька температури у нижньому перерізі (точки 1 та 2) обумовила перепад по висоті злитку у кінці нагрівання 100 °C – 120 °C (точки 6 та 2).

На рис. 3 представлено результати вимірювання витрати газу при безперервному способі подачі палива.

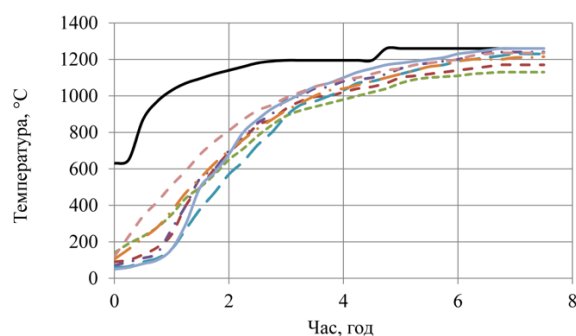


Рис. 2 – Результати вимірювання температури в дослідному злитку при нагріванні садки металу 08X18Ni10T: 1 – 7 – точки

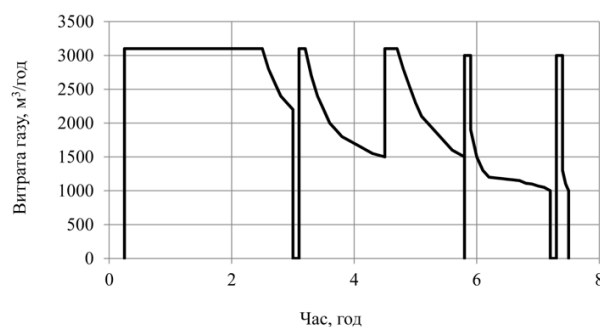


Рис. 3 – Витрата газу при безперервному способі подачі палива

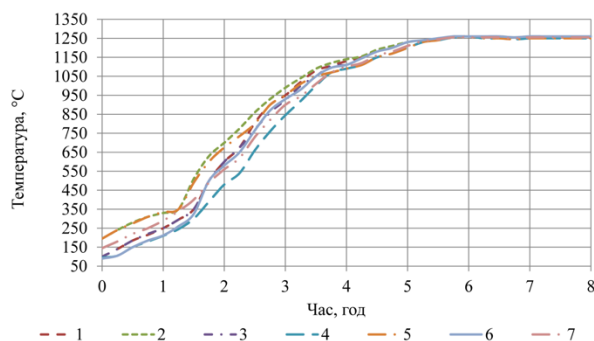


Рис. 4 – Зміна в часі температури чарунки та контрольних точок в дослідному злитку: 1 – 7 – точки

Аналіз результатів нагрівання дослідного злитку разом з технологічними злитками нержавіючих сталей показав як відмінність, яка проявилася в різному кінцевому перепаді температури, так і схожість, яка характеризується подібністю розподілу температури в об'ємі дослідного злитка. Відмінність кінцевих перепадів температури визначається температурним станом печі і технологічного металу при його посадці в колодязь, різницями в масі садки, а також характером тепловиділення по висоті робочої камери печей даного типу. Подібність розподілу температури визначається схожістю режимів нагрівання нержавіючих марок сталі.

Отримані результати досліджень нагрівання злитків при безперервній подачі палива дозволяють зробити такі висновки:

1 Температура печі в кінці витримування відповідає максимальній температурі у злитку, який знаходиться близько до термопари.

2 Максимальний перепад температур у злитку становить на кінець нагрівання 80 °C – 120 °C та визначається нерівномірністю температурного поля в колодязі.

3 У зв'язку з тим, що на кінець витримування розподіл температур у злитку істотно не міняється, має сенс скоротити загальну тривалість витримування для нержавіючих марок сталі на 0,5 – 1 годину або на 10 % – 20 %.

4 Температура підігрівання повітря в керамічному рекуператорі в процесі нагрівання садки металу змінюється в середньому від 400 °C до 600 °C, що є значно нижче за паспортні дані.

Як було вже зазначено, основним недоліком печей періодичної дії є неоднорідність нагрівання злитків внаслідок погіршення умов тепловіддачі та несприятливого розподілу температур при зменшенні теплового навантаження в період витримки металу. Одним з методів знешкодження цього недоліку є застосування імпульсного опалення.

При імпульсному способі подачі палива встановлюють два рівня витрати палива: максимальний і мінімальний відповідно до максимального і мінімального теплового навантаження.

Для реалізації імпульсного способу опалення на чарунці була змонтована система автоматичного регулювання. Система підтримує температуру чарунки в заданих межах і здійснює імпульсну подачу палива і повітря в період витримки. При цьому забезпечується випереджальна подача повітря на початку імпульсу і затримку відсічки повітря на початку паузи.

Система імпульсного опалення забезпечує підтримання заданого співвідношення газ – повітря під час витримки. Це дозволяє виключити недоопалення та знижує його умовну витрату.

Діапазон періодичної зміни температури в колодязі визначається налаштуванням диференційного контактного задатчика. В розглянутих

режимах він складає $10\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Частота зміни температури колодязю на витримці визначається його тепловою інерційністю. При вказаному діапазоні періодичної зміни температури частота складає 4–12 хвилин. Сквашність імпульсів, тобто відношення тривалості імпульсів к періоду чергування імпульсів, на початку витримки більше, ніж в кінці, оскільки не завершено процес поглинання тепла металом та кладкою. По мірі прогріву, до кінця витримки, сквашність значно зменшується.

На рис. 4 представлені результати досліджень при нагріві злитків неіржавіючої сталі 10X23H18.

За півтори години витримки у колодязі при контактному факелі та закритій кришці температура в контрольних точках збільшилася до $200\text{ }^{\circ}\text{C} - 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. В цей час і протягом всього періоду підйому при максимальній тепловій потужності максимальні температури спостерігалися у нижній грані злитку, зверненої до раз огрітої кладки (точки 2, 5).

Максимальний перепад по злитку в момент виходу температури колодязю на задану, спостерігався між т. 2 та т. 4, яка розташована у центрі злитку, і склав $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Витримка в імпульсному режимі при температурі $1240\text{ }^{\circ}\text{C} - 1265\text{ }^{\circ}\text{C}$ протягом двох годин зменшила температурний перепад до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в т. 3 – $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$, в т. 7 – $1225\text{ }^{\circ}\text{C}$).

За час кантування, що тривало 10 хвилин температура колодязю зменшилася до $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температурний перепад у злитку збільшився до $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ (злиток не кантувався). Подальший підйом температури колодязю та витримка при температурі $1230\text{ }^{\circ}\text{C} - 1255\text{ }^{\circ}\text{C}$ привели до зменшення перепаду до $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в т. 3 – $1240\text{ }^{\circ}\text{C}$, в т. 2, 7 – $1255\text{ }^{\circ}\text{C}$). Розподіл температури залишався незмінним протягом останньої години витримки.

Обговорення результатів

Результати попередніх досліджень [3], [4] виявили, що максимальний перепад температур у злитку $80\text{ }^{\circ}\text{C} - 120\text{ }^{\circ}\text{C}$ обумовлений нерівномірністю температурного поля в колодязі. Доведено також можливість скорочення загальної тривалості витримки для нержавіючих марок сталі на 0,5 – 1 годину.

Зважаючи на попередні отримані результати дослідних режимів нагріву [4] актуальним завданням є підвищення енергетичної ефективності нагріву високолегованих марок сталі шляхом впровадження технології імпульсної подачі палива.

В роботі [5] автором підтверджується, що на даний час відсутній науковий опис технологічних процесів при імпульсній подачі палива.

Авторами [6] показано можливість використання імпульсного нагрівання для ефективності такої теплової обробки металевих заготовок, як витримка після нагрівання.

Висновки

Зіставлення результатів контрольних нагрівань і даних, що отримані в аналогічних умовах при звичному способі опалення дозволяє зробити наступний висновок: використання системи автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсну подачу палива в період витримки дозволить зменшити максимальний перепад по висоті злитка до $20\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, тоді як при звичайному опаленні, при поступовому зменшенні витрати палива на витримці він складає $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Досягається це за рахунок того, що в період томління під час імпульсів витрата палива значно збільшується, інтенсифікуються теплообмінні процеси у всьому об'ємі робочого простору, при цьому як і в період підйому температури колодязь працює при максимальному коефіцієнті корисної дії.

Під час пауз найбільш прогріті елементи поверхонь металу і кладки перевипромінують тепло на менш нагріті. Всередині металу теплота передається теплопровідністю, чим забезпечується вирівнювання температур за об'ємом злитку. Під час пауз паливо піччю не споживається та димовий шибер зачинений. Цей фактор разом зі стабільним підтриманням співвідношення паливо – повітря, забезпечує зменшення умовної витрати палива.

Список літератури

1. Свинолобов, Н. П. Печи черной металлургии : учеб. пособие для студ. металлург. специальностей вузов / Н. П. Свинолобов, В. Л. Бровкин. – Днепропетровск : Пороги, 2002. – 154 с.
2. Ткаченко, О. О. Високотемпературні процеси та установки : підручник : в 2-х частинах. Ч. I / О. О. Ткаченко. – 2-ге вид. – Харків : Видавництво «Ранок», 2008. – 336 с. – ISBN 978-966-672-134-4.
3. Чепрасов, О. І. Дослідження розподілу температур у злитках при нагріванні у рекуперативних нагрівальних колодязях / О. І. Чепрасов, Ю. М. Каюков, І. А. Назаренко // Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії : колективна монографія : у 2-х книгах. – Книга 1 / під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю. С. Пройдака. – Дніпро : Нова ідеологія, 2017. – С. 275–279. – ISBN 978-617-7068-42-5.
4. Каюков Ю. М. Дослідження нагріву високолегованих сталей у нагрівальному колодязі з опаленням з центру поду / О. І. Чепрасов, Ю. М. Каюков, І. А. Назаренко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск : ООО «Укрметаллургинформ «НТА», 2018. – № 4(313). – С. 81–85. – ISSN 0543-5749.
5. Бирюков А. Б. Моделирование процессов тепловой обработки заготовок в печах при произвольном характере изменения расхода топлива // Математичне моделювання. – 2013. – № 2(29). – С. 64–68. – ISSN 2519-8106 (print). – ISSN 2519-8114 (on-line).
6. Бирюков А. Б. Импульсный нагрев рабочего пространства в тепловых агрегатах / А. Б. Бирюков, С. М. Сафьянц, Е. В. Новикова, А. Н. Недбайло // Теплофизика та теплоенергетика. – 2012. – Т. 34, № 6. – С. 15–18. – ISSN 2663-7235 (print). – ISSN 2663-7243 (on-line).

References (transliterated)

1. Svinolobov, N. P., Brovkin V. L. (2002), *Pechi chernoj metallurgii : ucheb. posobie dlya stud. metallurg. special'nostej*

- vuzov [Furnaces of black metallurgy], Porogy, Dnipropetrovsk, 154 p.
2. Tkachenko, O. O. (2008), *Vy`sokotemperaturni procesy` ta ustanovky` : pidruchny`k [High-temperature processes and installations, Ch. I]*, Ranok Publishing House Kharkov, 336 p.
 3. Cheprasov O. I., Kayukov Yu. M., Nazarenko I. A. (2017), "Doslidzhennya rozpodilu temperatur u zly`tkax pry` nagrivan-ni u rekuperaty`vny`x nagrival`ny`x kolodyazyax [Investigation of temperature distribution in ingots at heating in recuperative heating wells]", *Teplotexnika, energety`ka ta ekologiya v meta-lurgiyi : kolekty`vna monografiya : u 2-x kny`gax. – Kny`ga 1* [Heat engineering, energy and ecology in metallurgy: collective monograph. In two books. Book first], Ed. Yu. S. Proydak, A New Ideology, Dnipro, pp. 275–279, ISBN 978-617-7068-42-5.
 4. Cheprasov O. I., Kayukov Yu. M., Nazarenko I. A. (2018), "Doslidzhennya nagrivu vy`sokolegovany`x stalej u nagrival`nomu kolodyazi z opalennyam z centru podu [Investi-gation of heating of high-alloy steels in a heating well with heating from the center of the pond]", *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost`* [Metallurgical and mining in-dustry], no 4(313), pp. 81–85, ISSN 0543-5749.
 5. Biryukov A. B. (2013), "Modelirovanie processov teplovoj obrabotki zagotovok v pechax pri proizvol`nom xaraktere iz-meniya rasxoda topliva [Modeling of processes of heat treatment of blanks in furnaces with arbitrary nature of changes in fuel flow]", *Mathematical Modeling*, no. 2(29), pp. 64–68, ISSN 2519-8106 (print), ISSN 2519-8114 (on-line).
 6. Biryukov A. B., Safyants S. M., Novikova E. V., Nedbailo A. N. (2012), "Impul`snyj nagrev rabocheho prostranstva v teplovyx agregatax [Impulse heating of the working space in thermal units]", *Thermophysics and thermal power engineer-ing*, vol. 34, no. 6, pp. 15–18, ISSN 2663-7235 (print), ISSN 2663-7243 (on-line).

Надійшла (received) 18.10.2023

Відомості про авторів / About the Authors

Назаренко Ірина Анатоліївна (Nazarenko Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, Національного універси-тету «Запорізька політехніка», доцент кафедри електричних машин, м. Запоріжжя; тел.: (099) 704-96-36; e-mail: irinan842@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424>.

Петрик Алексій Анатолійович (Petryk Oleksiy) – кандидат технічних наук, доцент, Національного університе-ту «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя; тел.: (050) 418-45-31; e-mail: iternel17@ukr.net; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5824-6287>.

Кузьменко Алла Анатоліївна (Kuzmenko Alla) – старший викладач Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя; тел.: (050) 451-60-50; e-mail: kaa1930kaa@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0051-535X>.

Луценко Альона Олексіївна (Lucenko Alena) – викладач спеціальних дисциплін в ВСП «Запорізький гідроенер-гетичний фаховий коледж ЗНУ», м. Запоріжжя; тел.: (050) 647-31-69; e-mail: lubenecalenaO@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8356-1656>.