

**О. І. ЧЕПРАСОВ, Ю. М. КАЮКОВ, І. А. НАЗАРЕНКО**

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПУЛЬСНОЇ ПОДАЧІ ПАЛИВА

Виявлено значні конструктивні недоліки колодязів, що впливають на рівномірність нагрівання металу питому витрату палива та рівень експлуатаційних витрат. Зазначено, що актуальним завданням є підвищення енергетичної ефективності нагріву високолегованих марок сталі шляхом впровадження технології імпульсної подачі палива. Досліджено ефективність впровадження імпульсної подачі палива для нагрівальних колодязів з опаленням з центру поду. Зіставлення результатів контрольних нагрівів і даних, що отримані в аналогічних умовах при звичному способі опалення показало, що використання системи автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсну подачу палива в період витримки дозволить зменшити максимальний перепад температур по висоті злитка до (20...30) °С. Натурні експерименти показали, що скважність 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, скважність значно зменшується. Запропонована система імпульсного опалення забезпечує підтримання заданого співвідношення газ – повітря під час витримки. Це дозволяє виключити недопалення та знижує умовну витрату палива. Доведено, що застосування імпульсного подавання палива в період витримки дозволить інтенсифікувати теплообмінні процеси, підвищити рівномірність нагріву та зменшити умовну витрату палива.

**Ключові слова:** нагрівальний колодязь, імпульсне опалення, високолеговані сталі, температурний режим, нагрівання злитків металу, температурне поле, система автоматичного регулювання.

**А. И. ЧЕПРАСОВ, Ю. Н. КАЮКОВ, И. А. НАЗАРЕНКО**

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ПОДАЧИ ТОПЛИВА

Выявлены значительные конструктивные недостатки колодцев, влияющие на равномерность нагрева металла удельный расход топлива и уровень эксплуатационных расходов. Отмечено, что актуальной задачей является повышение энергетической эффективности нагрева высоколегированных марок стали путем внедрения технологии импульсной подачи топлива. Исследована эффективность внедрения импульсной подачи топлива для нагревательных колодцев с отоплением из центра пода. Сопоставление результатов контрольных нагревов и данных, полученных в аналогичных условиях при обычном способе отопления показало, что использование системы автоматического регулирования, которая реализует импульсную подачу топлива в период выдержки позволит уменьшить максимальный перепад температур по высоте слитка до (20...30) °С. Натурные эксперименты показали, что скважность импульсов, то есть отношение длительности импульсов к периоду чередования импульсов, в начале выдержки больше, чем в конце, поскольку не завершен процесс поглощения тепла металлом и кладкой. По мере прогрева, до конца выдержки, скважность значительно уменьшается. Предложенная система импульсного отопления обеспечивает поддержание заданного соотношения газ – воздух во время выдержки. Это позволяет исключить недожег и снижает условный расход топлива. Доказано, что применение импульсного способа подачи топлива в период выдержки позволит интенсифицировать теплообменные процессы, повысить равномерность нагрева и уменьшить условный расход топлива.

**Ключевые слова:** нагревательный колодец, импульсное отопление, высоколегированные стали, температурный режим, нагрев слитков металла, температурное поле, система автоматического регулирования.

**A. CHEPRASOV, YU. KAYUKOV, I. NAZARENKO**

### RESEARCH THE EFFICIENCY OF PULSE FEEDING OF FUEL

Significant structural defects of wells, which influence the uniformity of metal heating, specific fuel consumption and operating costs are revealed. It was noted that the actual task is to increase the energy efficiency of heating high-alloy steel grades by introducing pulsed fuel supply technology. Efficiency of introduction of impulse fuel supply for heating boilers with heating from the center of the dowel is investigated. Comparison of the results of control heating and data obtained in similar conditions under the usual heating method has shown that the use of the automatic control system, which implements impulse fuel supply during the period of holding, will reduce the maximum temperature difference over the ingot height to (20...30) °C. Natural experiments showed that the pulse width, that is, the ratio of the duration of the pulses to the period of the interleaving of the pulses, at the beginning of exposure is greater than at the end, since the process of absorption of heat by the metal and clay is not completed. As warm up, until the end of exposure, the efficiency is significantly reduced. The proposed system of pulsed heating ensures the maintenance of the given ratio of gas-air during exposure. This allows to eliminate ignored and reduces the conditional fuel consumption. It has been proved that the use of a pulsed method of supplying fuel during the period of holding will allow to intensify heat transfer processes, increase the uniformity of heating and reduce the conditional fuel consumption.

**Key words:** heating well, pulsed heating, high-alloy steels, temperature, heating of metal ingots, temperature field, automatic control system.

#### Вступ

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 продукту 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.

Важливою стратегією також є перехід до ре-

сурсозберігаючих 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 [1–5].

### Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Результати попередніх досліджень [6, 7] виявили, що максимальний перепад температур у злитку (80...120 °С) обумовлений нерівномірністю температурного поля в колодязі. Доведено також можливість скорочення загальної тривалості витримування для нержавіючих марок сталі на 0,5...1 годину.

Зважаючи на попередні отримані результати дослідних режимів нагріву [7] актуальним завданням є підвищення енергетичної ефективності нагріву високолегованих марок сталі шляхом впровадження технології імпульсної подачі палива.

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.

### Мета та задачі дослідження

Метою роботи є дослідження імпульсного способу подачі палива для підвищення якості нагріву легованих сталей та ефективності паливовикористання у нагрівальних колодязях.

### Методи дослідження ефективності імпульсної подачі палива

Досліджувані колодязі опалюються природньою сумішшю з теплою згорання 6,7 МДж/м<sup>3</sup>. Розміри робочої камери 4,8×4,6 м, висота 3,0 м. Контроль температури печі здійснюється за показаннями потенціометра на щиті КВП, 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 нагрівках злиток з отворами встановлювали поруч з пічною термопарою, температура у злитку контролювалася в семи точках (див. рис. 1). Замірювання температури виконували термоелектричними термометрами ТХА у комплекті з багатоточковим потенціометром.

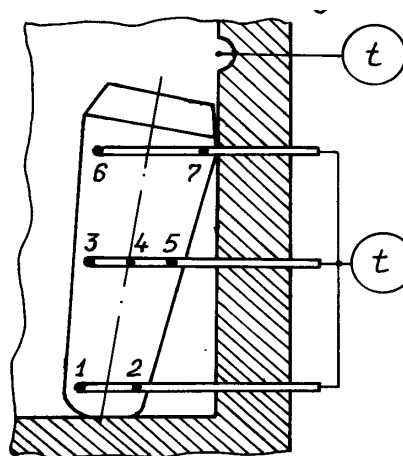


Рис. 1 – Схема розташування точок вимірювання температури у дослідному злитку:  
1–7 – точки вимірювання температури

При імпульсному способі подачі палива встановлюють два рівня витрати палива: максимальний і мінімально відповідні максимальному і мінімальному тепловому навантаженню.

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 недопалення та знижує його умовну витрату. Результати заміру температури в дослідному злитку наведені в табл. 1.

Діапазон періодичної зміни температури в колодязі визначається налаштуванням диференційного контактного задатчика. В розглянутих режимах він складає (10...15) °С. Частота зміни температури колодязю на витримці визначається його тепловою інерційністю. При вказаному діапазоні періодичної зміни температури частота складає (4...12) хвилин. Скважність (шпаруватість) 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, скважність значно зменшується.

Таблиця 1 – Результати заміру температури в дослідному злитку

Номер нагріву	Марка сталі, маса, (кількість злитків), т (шт)	Тем-ра при посадці, °С		Температура в кінці нагріву, °С							Макс. перепад температури в дослідному злитку, °С	
		печі	металу	в контрольних точках дослідного злитка								
				печі	1	2	3	4	5	6		7
1	12X18Н9Т, 49 (14)	800	560	1210–1235	1190	1180	1180	1190	1175	1195	1193	20
	8ХФ, 10,5 (3)	800	590		1200	1200	1220	1220	1215	1200	1205	
2	08Х18Н10Т, 42 (12)	800	600	1230–1255	1200	1200	1220	1220	1215	1200	1205	20
	Ст.30, 10,5 (3)	800	540		1230	1225	1240	1235	1230	1235	1225	
3	10Х23Н18, 52,5 (15)	770	570	1230–1255	1265	1275	1273	1268	1270	1250	1260	15
4	08Х18Н10Т, 28 (8)	800	> 500	1240–1265	1265	1275	1273	1268	1270	1250	1260	25
	15Х, 21 (6)	800	> 500		1265	1275	1273	1268	1270	1250	1260	

### Результати дослідження ефективності імпульсної подачі палива

На рис. 2 наведені результати досліджень при нагріві дванадцяти злитків неіржавіючої сталі 08Х18Н10Т та трьох злитків Ст. 30. Температура посади – 540 °С. Нагрівання проводилося за температурним режимом, який застосовується при нагріві пластинчастої неіржавіючої сталі. Дослідний злиток не повністю охолов після попереднього нагріву і його температура складала (300...360) °С. За півгодини витримки у колодязі при контрольному факелі та закритій кришці температура в контрольних точках збільшилася до (400...500) °С. При цьому максимальна температура спостерігалася у грані злитка, яка отримує тепло від раз огрітої кладки (точки 2, 5, 7).

Період підйому температури колодязю до 1300 °С проводився при максимальному тепловому навантаженні протягом двох з половиною годин. При досягненні в колодязі температури витримки максимальний температурний перепад у злитку склав 100 °С (точки 1, 2, 5 та 3).

Подальша витримка в імпульсному режимі при температурі (1280...1310) °С та на другій ступені (1230...1255) °С практично усунула температурний перепад в дослідному злитку.

Відкриття кришки колодязю для видачі трьох злитків сталі Ст. 30, наступний підйом температури печі до заданої та витримка протягом години привели до того, що перепад температур у злитку склав 20 °С. Розподіл температури практично не змінилося до кінця витримки, при цьому повністю співпала температура контрольних точок донної та головної частини злитку (точки 1, 2, 6, 7).

На рис. 3 представлені результати досліджень при нагріві злитків неіржавіючої сталі 10Х23Н18. За півтори години витримки у колодязі при контактному факелі та закритій кришці температура в контрольних точках збільшилася до (200...300) °С. 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 точкою 2 та точкою 4, яка розташована у центрі злитку, і склав 100 °С. Витримка в імпульсному режимі при температурі (1240...1265) °С протягом двох годин зменшила температурний перепад до 15 °С (в т. 3 – 1240 °С, в т. 7 – 1225 °С).

За час кантування, що тривало 10 хвилин, температура колодязю зменшилася до 1150 °С. Температурний перепад у злитку збільшився до 30 °С (злиток не кантувався). Подальший підйом температури колодязю і витримка при температурі (1230...1255) °С привели до зменшення перепаду до 15 °С (в т. 3 – 1240 °С, в т. 2, 7 – 1225 °С). Розподіл температур оставався не змінним протягом останньої години витримки.

Було також проведено дослідження при нагріві восьми злитків сталі 08Х18Н10Т та шести злитків сталі 15Х. Дослідний злиток знаходився у колодязі до початку нагріву протягом півтори години та мав температуру (280...380) °С. Весь метал був холодним, чим пояснюється тривалість підйому до 1300 °С при максимальній тепловій потужності. При досягненні 1300 °С, на початку періоду витримки перепад температур в дослідному злитку склав 60 °С. Витримка металу з імпульсною подачею палива при температурі колодязю (1290...1310) °С протягом п'ятдесяти хвилин і наступна витримка при температурі (1250...1270) °С протягом години привели до зменшення перепаду до 25 °С.

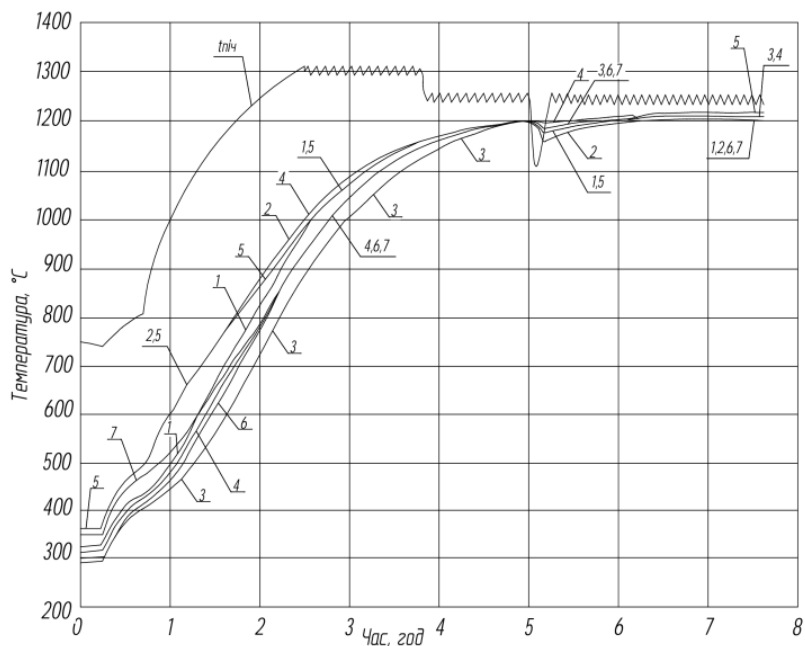


Рис. 2 – Зміна в часі температури чарунки та контрольних точок в дослідному злитку сталі 08X18N10T:  
1–7 – точки вимірювання температури

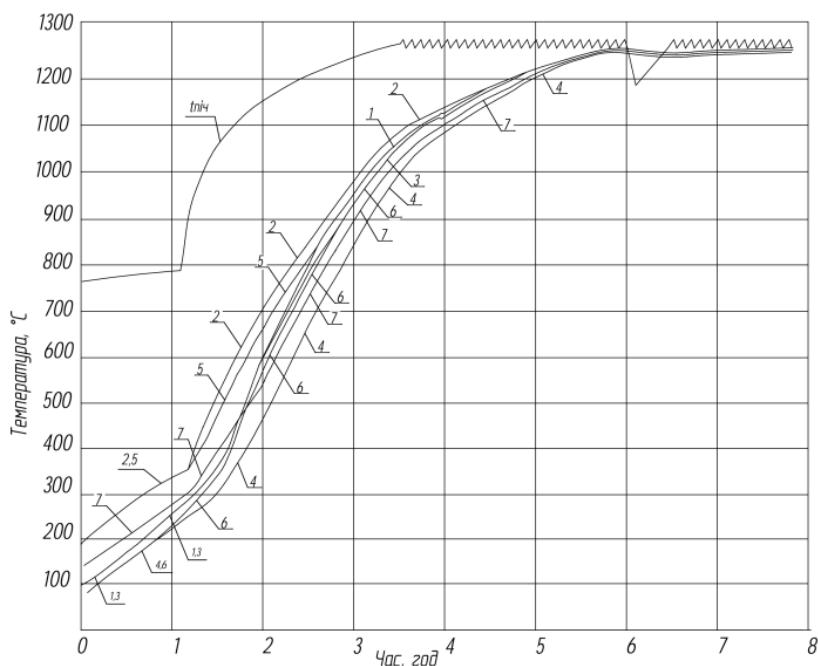


Рис. 3 – Зміна в часі температури чарунки та контрольних точок в дослідному злитку сталі 10X23N18:  
1–7 – точки вимірювання температури

Відкриття кришки та видача шести злитків сталі 15X привели до падіння температури колодязю до 1120 °C і збільшенню температурного перепаду до 50 °C. витримка протягом чотирьох годин при температурі (1240...1265) °C дозволила скоротити перепад температур у злитку до 25 °C. При цьому

розподіл температур істотно не змінився протягом останніх чотирьох годин витримки.

Необхідно враховувати, що в нагрівальному колодязі з опаленням з центру поду злитки знаходяться в неоднакових умовах і на їх нагрівання впливає велике число факторів, тому розподіл те-

мператур в інших злитках садки може декілька відрізняться від розподілу температур в дослідному злитку.

### Висновки

Зіставлення результатів контрольних нагрівів 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...30) °С, тоді як при звичайному опаленні, при поступовому зменшенні витрати палива на витримці він складає 100 °С. 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 перевипромінюють 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. Тайц Н. Ю. *Технология нагрева стали*. Москва: Металлургиздат, 1962. 567с.
2. Миткалинний В. И., Хлопокин В. Н., Мешалин В. С. [и др.] Усовершенствованная система отопления нагревательных колодцев при подаче топлива из центра пода. *Сталь*. 1979. № 4. С. 312–314.
3. Аксельруд Л. Г., Сухов И. И., Тымчак В. М. *Нагревательные колодцы*. Москва: Металлургиздат, 1962. 236 с.
4. Свинолобов Н. П., Бровкин В. Л. *Печи черной металлургии*. Днепропетровск: Пороги, 2002. 154с.

5. Ткаченко О. О. *Високотемпературні процеси та установки*. Харків: Ранок, 2008. 336 с.
6. Чеprasов О. І., Каюков Ю. М., Назаренко І. А. Дослідження розподілу температур у злитках при нагріванні у рекуперативних нагрівальних колодцях. *Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії* : колективна монографія. У 2-х книгах. Книга перша / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю. С. Пройдака. Дніпро: Нова ідеологія, 2017. С. 275–279. ISBN 978-617-7068-42-5.
7. Чеprasов О. І., Каюков Ю. М., Назаренко І. А. Дослідження нагріву високолегованих сталей у нагрівальному колодязі з опаленням з центру поду. *Металургическая и горнорудная промышленность*. Днепропетровск: ООО «Укрметаллургинформ «НТА», 2018. № 4(313). С. 81–85. ISSN 0543-5749.

### References (transliterated)

1. Taits N. Yu. (1962), *Tehnologija nagreva stali* [Steel heating technology], Metallurgizdat, Moscow, 567 p.
2. Mitkalinnyy V. I., Khlopokin V. N., Meshalin V. S. etc. (1979), "Usovershenstvovannaja sistema otoplenija nagrevatel'nyh kolodcev pri podache topliva iz centra poda [Improved heating system of heating wells when supplying fuel from the center of the hearth]", *Stal'* [Steel], no 4, pp. 312–314.
3. Axelrud L. G., Sukhov I. I., Tymchak V. M. (1962), *Nagrevatel'nye kolodcy* [Heating wells], Metallurgizdat, Moscow, 236 p.
4. Svinolob N. P., Brovkin V. L. (2002), *Pechi chernoj metallurgii* [Furnaces of ferrous metallurgy], Thresholds, Dnepropetrovsk, 154 p.
5. Tkachenko O. O. (2008), *Vysokotemperaturni procesy ta ustanovky* [The high temperature process of the installation], Ranok, Kharkiv, 336 p.
6. Cheprasov O. I., Kayukov Yu. M., Nazarenko I. A. (2017), "Doslidzhennja rozpodilu temperatur u zlytkah pry nagrivanii u rekuperatyvnyh nagrival'nyh kolodjazjah [Investigation of temperature distribution in ingots at heating in recuperative heating wells]", *Teplotehnika, energetyka ta ekologija v metallurgii* : kolektivna monografija. U 2-h knyghah. Knyga persha [Heat engineering, energy and ecology in metallurgy: collective monograph. In two books. Book first], Yu. S. Proydak (ed.), A New Ideology, Dnipro, pp. 275–279, ISBN 978-617-7068-42-5.
7. Cheprasov O. I., Kayukov Yu. M., Nazarenko I. A. (2018), "Doslidzhennja nagrivu vysokolegovanyh stalej u nagrival'nomu kolodzji z opalennjam z centru podu [Investigation of heating of high-alloy steels in a heating well with heating from the center of the pond]", *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'* [Metallurgical and mining industry], LLC "Ukrmetallurginform "NTA", Dnipropetrovsk, no 4(313), pp. 81–85, ISSN 0543-5749.

Надійшла (received) 07.08.2019

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Чеprasов Олександр Іванович (Чеprasov Alesandr Ivanovich, Cheprasov Alesandr Ivanovich)** – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Інженерного інституту Запорізького національного технічного університету; м. Запоріжжя; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8029-5157>; e-mail: alex.i.cheprasov@gmail.com.

**Каюков Юрій Миколайович (Каюков Юрій Николаевич, Kayukov Yury Nikolaevich)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Інженерного інституту Запорізького національного технічного університету; м. Запоріжжя; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4311-4801>; e-mail: lenajura2010@gmail.com.

**Назаренко Ірина Анатоліївна (Назаренко Ирина Анатоліевна, Nazarenko Irina Anatolievna)** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Інженерного інституту Запорізького національного технічного університету; м. Запоріжжя; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4200-4424>; e-mail: irinan842@gmail.com.