

**О.І. Бабаченко**, д.т.н., с.н.с., директор, ORCID 0000-0003-4710-0343

**Л.Г. Тубольцев**, к.т.н., с.н.с., зав.відділом, ORCID 0000-0001-6873-6685

*Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України*

## **ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗВИТОК ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ НА СЕРЕДНЬОСТРОКОВУ І ДОВГОСТРОКОВУ ПЕРСПЕКТИВУ**

**Анотація.** Метою дослідження є виявлення сучасних тенденцій розвитку металургійних технологій з урахуванням екологічних проблем довкілля. У світі відбуваються серйозні зміни щодо екологічної політики, яка стала невід'ємною частиною промислової політики та міжнародної торгівлі. Аналіз показує певний зв'язок підвищення температури Землі зі зростанням виробництва сталі у світі. Тому Паризька кліматична угода, що була підтримана більшістю промислово розвинених країн, базується на ідеї обмеження та зменшення викидів парникових газів промисловими підприємствами. З одного боку, викиди промислового виробництва безперечно впливають на екологічний стан довкілля. З іншого боку, різке зменшення виробничих викидів суттєво збільшує фінансові витрати. У світі екологічні вимоги до металургійних процесів набувають такого рівня, що загрожують перспективам розвитку металургії. Показано, що вибір оптимального шляху екологічного розвитку вимагає пошуку нових рішень для підвищення рівня впровадження екологічних інновацій підприємствами України. Для виявлення впливу технологій виробництва різних видів металургійної продукції застосовано методіку експертно-математичного оцінювання з використання функції бажаності Харрінгтона. Показано, що для прокатної продукції оцінка має значення «задовільно» або «добре». Гірше ситуація з виробництвом залізорудної сировини, чавуну та сталі – тут комплексна оцінка показує значення «незадовільно» та «задовільно». Ця теза підтверджується тим фактом, що інвестиції металургійних підприємств екологічної спрямованості нині спрямовуються на покращення екологічних показників у зазначених напрямках. Перспектива розвитку металургії України має бути пов'язана з реалізацією нових технічних рішень, зокрема тих розробок, що знаходяться в стадії пошукових досліджень та експериментальних зразків. Показано наукові розробки Інституту чорної металургії НАН України, спрямовані на зменшення енергоємності та поліпшення екологічних показників металургійного виробництва

**Ключові слова:** металургія, екологічний стан, технології, парникові гази, інвестиції, наукові дослідження

**Вступ.** Відставання технічного рівня металургійного виробництва ГМК України від кращих світових досягнень являє високі ризики для національної безпеки. Проведений аналіз показав, що металургійною наукою розробляються й удосконалюються технологічні процеси, що можуть мати вирішальне значення для створення металургії майбутнього.

**A.I. Babachenko**, Dr. Sci., Senior Researcher, Director, ORCID 0000-0003-4710-0343

**L.G. Tuboltsev**, Ph.D., Senior Researcher, Head of Department, ORCID 0000-0001-9540-3037

*Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine*

## **TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF FERROUS METALLURGY OF UKRAINE IN THE MEDIUM-TERM AND LONG-TERM PERSPECTIVE**

**Summary.** The purpose of the study is to identify current trends in metallurgical technologies, taking into account environmental problems. The world is undergoing major changes in environmental policy, which has become an integral part of industrial policy and international trade. The analysis shows a certain connection between the increase in Earth's temperature and the growth of steel production in the world. Therefore, the Paris Climate Agreement, which was supported by most industrialized countries, is based on the idea of limiting and reducing greenhouse gas emissions by industrial enterprises. On the one hand, industrial emissions undoubtedly affect the ecological state of the environment. On the other hand, a sharp reduction in production emissions significantly increases financial costs. In the world, environmental requirements for metallurgical processes are gaining such a level that threatens the prospects for the development of metallurgy. It is shown that the choice of the optimal path of ecological development requires the search for new solutions to increase the level of implementation of ecological innovations by Ukrainian enterprises. To identify the impact of production technologies of different types of metallurgical products, the method of expert-mathematical evaluation using the Harrington desirability function was used. It is shown that for rolled products the rating means «satisfactory» or «good». The situation with the production of iron ore, pig iron and steel is worse - here a comprehensive assessment shows the value of «unsatisfactory» and «satisfactory». This thesis is confirmed by the fact that investments of ecological orientation of the Ukrainian metallurgical enterprises are now directed on improvement of ecological indicators in the specified directions. Prospects for the development of metallurgy in Ukraine should be associated with the implementation of new technical solutions, in particular those developments that are in the stage of exploratory research and experimental samples. Scientific developments of the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, aimed at reducing energy consumption and improving the environmental performance of metallurgical production

**Keywords:** metallurgy, ecological state, technologies, greenhouse gases, investments, scientific researches

**Introduction.** The lag of the technical level of metallurgical production of MMC of Ukraine from the best world achievements poses high risks to national security. The analysis showed that metallurgical science develops and improves technological processes that can be crucial for the creation of metallurgy in the future.

*«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34*

Перспектива розвитку металургії України має бути пов'язана з реалізацією нових технічних рішень, зокрема розробок, що знаходяться в стадії пошукових досліджень та експериментальних зразків. Своєчасне наукове вивчення цих розробок є актуальним завданням і Інституту чорної металургії НАН України, який займає в металургійній науці країни провідне місце в розробці та реалізації перспективних металургійних технологій.

В останні роки особливої уваги в сучасних умовах набувають вимоги до поліпшення екологічної ситуації у регіонах розташування металургійних підприємств. Екологічні вимоги до металургійних процесів набувають такого рівня, що загрожують перспективам розвитку металургії. У той же час в Україні недостатньою мірою використовуються поширені у світовій практиці технології виробництва чорних металів з високою екологічною безпекою та низьким рівнем споживання енергоресурсів.

У світі відбуваються серйозні зміни щодо екологічної політики, яка стала невід'ємною частиною геополітики та міжнародної торгівлі. Останній рік у ЄС обговорюється можливість введення «прикордонного вуглецевого коригування» (Carbon border adjustment - CBA). CBA - це платіж, який буде стягуватися при ввезенні в ЄС продукції, виходячи з обсягів викидів CO<sub>2</sub> в процесі її виробництва. Фактично CBA - це спеціальний фіскальний інструмент, що дозволить наповнювати бюджет ЄС за рахунок експортерів, з одного боку; а також являє собою нову форму протекціонізму для захисту своїх ринків - з іншого. Практично у всіх українських експортних товарів витрати вуглецю при виробництві продукції (вуглецевість) вище, ніж у європейських аналогів [1]. В таких умовах український експорт стає цікавим об'єктом для оподаткування в рамках CBA.

Втім, щодо екологічного впливу промисловості на стан довкілля все ще ідуть дискусії. З одного боку, викиди промислового виробництва безперечно впливають на екологічний стан довкілля та підвищення середньої температури на поверхні Землі. З іншого боку, різке зменшення виробничих викидів суттєво збільшує фінансові витрати, що може привести до скорочення виробництва, або банкрутства підприємств. І тут необхідним є розумний баланс інтересів.

Щорічні дослідження американського космічного агентства NASA показують поступове підвищення середньої температури на поверхні Землі за останні 100 років. Переважає думка, що це потепління в значній мірі зумовлено збільшенням викидів в атмосферу двоокису вуглецю та інших парникових газів в результаті промислової діяльності людей. Але коливання температури на поверхні Землі спостерігалось і в давні часи та не були пов'язані з промисловою діяльністю.

Prospects for the development of metallurgy in Ukraine should be associated with the implementation of new technical solutions, including developments that are in the stage of exploratory research and experimental samples. Timely scientific study of these developments is an urgent task of the Iron and Steel Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, which occupies a leading place in the metallurgical science of the country in the development and implementation of promising metallurgical technologies.

In modern conditions, special attention is paid to the requirements for improving the environmental situation in the regions of metallurgical enterprises. Environmental requirements for metallurgical processes are becoming so high that they threaten the prospects for the development of metallurgy. At the same time, Ukraine does not sufficiently use the widespread in world practice technologies for the production of ferrous metals with high environmental safety and low energy consumption.

The world is undergoing major changes in environmental policy, which has become an integral part of industrial policy and international trade. Last year, the EU was discussing the possibility of introducing «Carbon border adjustment» (CBA). CBA is a payment that will be charged when products are imported into the EU, based on the amount of CO<sub>2</sub> emissions during its production. In fact, the CBA is a special fiscal instrument that will fill the EU budget at the expense of exporters; and is a new form of protectionism to protect their markets. Almost all Ukrainian export goods have higher carbon consumption in production (carbon content) than European counterparts [1]. In such conditions, Ukrainian exports become an interesting object for taxation under the CBA.

However, the environmental impact of industry on the environment is still debated. On the one hand, industrial emissions undoubtedly affect the ecological state of the environment and increase the average temperature on the Earth's surface. On the other hand, a sharp reduction in production emissions significantly increases financial costs, which can lead to a reduction in production or bankruptcy of enterprises. And here a reasonable balance of interests is necessary.

Annual research by the US space agency NASA shows a gradual increase in the average temperature on the Earth's surface over the past 100 years. The prevailing view is that this warming is largely due to increased emissions of carbon dioxide and other greenhouse gases as a result of human industrial activity. But fluctuations in temperature on the Earth's surface have been observed in ancient times and were not related to industrial activities.

Відома Паризька кліматична угода, що була підтримана більшістю промислово розвинених країн, базується на ідеї обмеження та зменшення викидів парникових газів промисловими підприємствами. Однак, навіть повне виконання Паризької угоди по клімату не гарантує, що нашу планету вдасться врятувати від глобального потепління [2]. Прихильники та противники обмеження викидів парникових газів та їхнього впливу на стан довкілля поки що не знайшли єдиної стратегії розвитку світової промисловості. Тому екологічні дослідження необхідно продовжувати.

**Метою дослідження** є виявлення сучасних тенденцій розвитку світової металургії та розроблення прогнозу щодо удосконалення технологій металургійного виробництва України з урахуванням екологічних проблем довкілля. Дослідження взаємозв'язку енергоємності і екологічних показників виробництва сучасного та перспективного асортименту продукції є актуальним науковим завданням, що має безпосереднє значення для виробництва металургійної продукції.

### Основні результати дослідження

Розглянемо питання щодо негативного впливу металургійного виробництва на довкілля більш докладно.

Аналіз взаємозв'язку зміни температури поверхні Землі з рівнем виробництва сталі у світі показує (рис.1), що можливо відслідкувати певний зв'язок підвищення температури Землі зі зростанням виробництва сталі у світі. Особливо чітка залежність спостерігається після 2008 року.

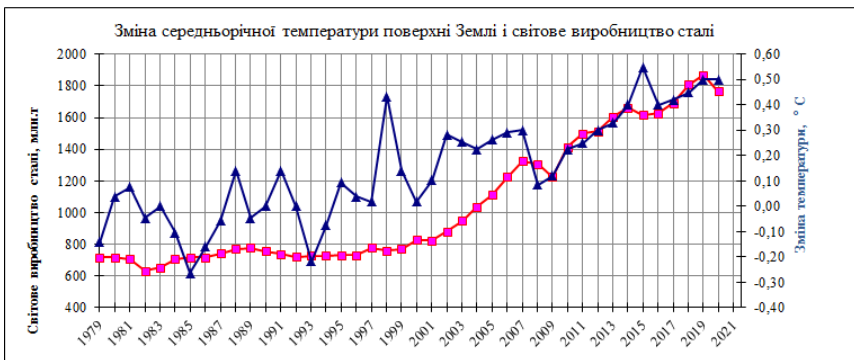


Рисунок 1.1 – Зміна середньорічної температури поверхні Землі та виробництво сталі у світі.

Обсяги світового виробництва сталі є однозначним параметром, що характеризує обсяги виробництва у світі промислової продукції та загальний розвиток промисловості. Наведені на рис.2 дані свідчать, що рівень світового ВВП прямо залежить від рівня виплавки сталі у світі.

The famous Paris Climate Agreement, which was supported by most industrialized countries, is based on the idea of limiting and reducing greenhouse gas emissions by industrial enterprises. However, even the full implementation of the Paris Climate Agreement does not guarantee that our planet will be saved from global warming [2]. Proponents and opponents of limiting greenhouse gas emissions and their impact on the environment have not yet found a single strategy for global industry. Therefore, environmental research needs to be continued.

**The purpose of the study** is to identify current trends in world metallurgy and develop a forecast for improving the technology of metallurgical production in Ukraine, taking into account environmental problems. The study of the relationship between energy intensity and environmental performance of modern and promising products is an urgent scientific task that is of direct importance for the production of metallurgical products.

**The main results of the study.** Consider the negative impact of metallurgical production on the environment in more detail.

Analysis of the relationship between changes in the Earth's surface temperature and the level of steel production in the world shows (Fig. 1) that it is possible to trace a certain relationship between the increase in Earth's temperature and the growth of world steel production. Particularly clear dependence is observed after 2008.

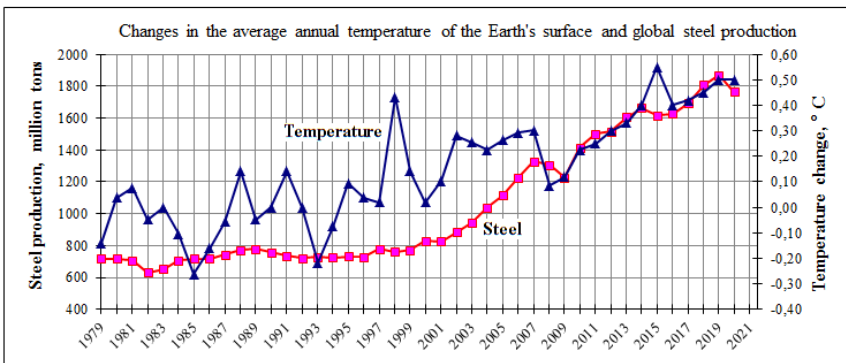


Figure 1 – Changes in the average annual temperature of the Earth's surface and steel production in the world.

The volume of world steel production is an unambiguous parameter that characterizes the volume of industrial production in the world and the overall development of industry. The data shown in Figure 2 show that the level of world GDP directly depends on the level of steelmaking in the world.

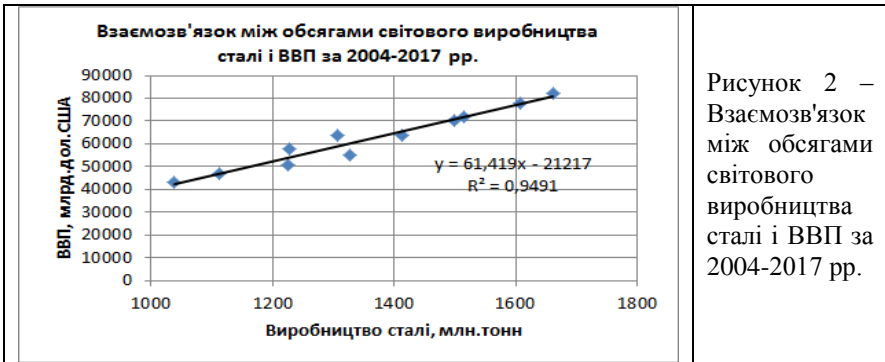


Рисунок 2 –  
Взаємозв'язок між обсягами світового виробництва сталі і ВВП за 2004-2017 рр.

Таким чином, обсяги виробництва сталі у світі є одним з показників впливу промисловості на екологічні показники. У той же час аналіз взаємозв'язку зміни середньорічної температури поверхні Землі та обсягами виробництва сталі у світі показує (рис.3), що чіткої залежності впливу промисловості на підвищення температури Землі не виявлено. До рівня виробництва сталі у світі на рівні 800 млн.т на рік, що було характерним для світового виробництва у 1991-2002 роках, промислове виробництво не впливало на зміну температури поверхні Землі. У 2002-2014 роках температура Землі підвищилась на 0,30С, але чіткої залежності від рівня виробництва сталі не спостерігалось, що свідчить про вплив на температуру інших факторів.

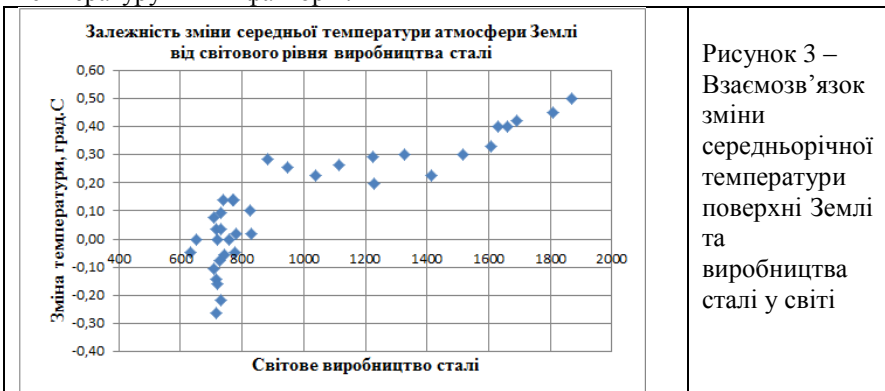
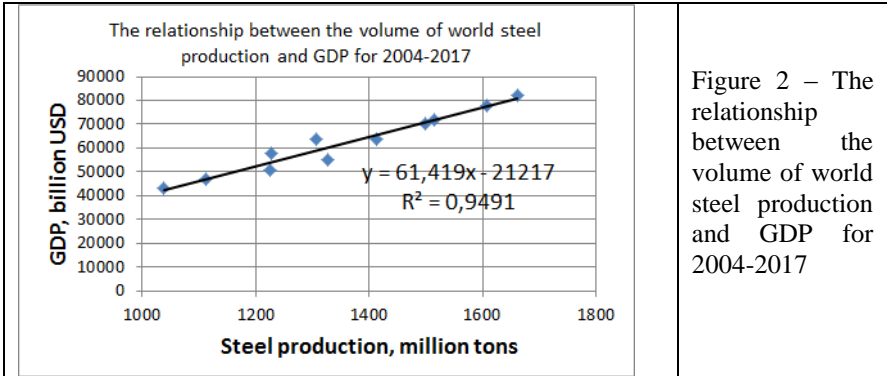
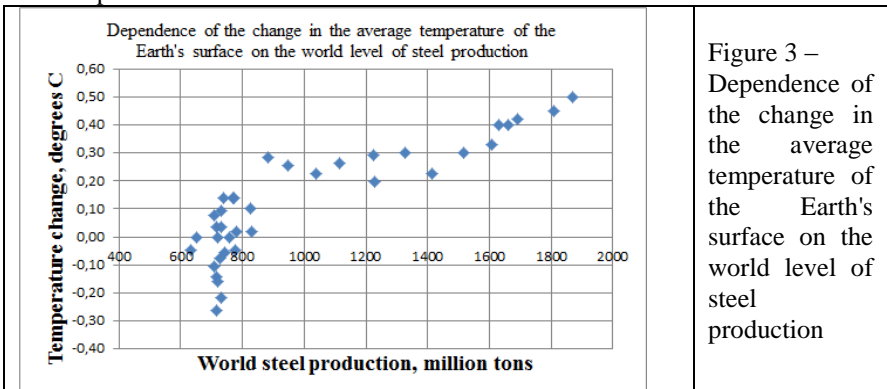


Рисунок 3 –  
Взаємозв'язок зміни середньорічної температури поверхні Землі та виробництва сталі у світі

Але, не враховувати вплив промисловості на зміну клімату Землі неможливо, оскільки навіть відносно невелика зміна клімату, може запустити інші природні процеси, здатні значно посилити розігрів нашої планети.



Thus, the volume of steel production in the world is one of the indicators of the impact of industry on environmental performance. At the same time, the analysis of the relationship between changes in the average annual surface temperature of the Earth and steel production in the world shows (Fig. 3) that a clear relationship between the impact of industry on rising Earth temperature is not found. Up to the level of world steel production at the level of 800 million tons per year, which was typical for world production in 1991-2002, industrial production did not affect the change in surface temperature. In 2002-2014, the Earth's temperature increased by  $0.3^{\circ}\text{C}$ , but no clear dependence on the level of steel production was observed, which indicates the influence of other factors on the temperature.



However, it is impossible not to take into account the impact of industry on the Earth's climate change, because even a relatively small change in climate can trigger other natural processes that can significantly increase the warming of our planet.



На думку більшості вчених, навіть «безпечно» потепління в рамках Паризької угоди може зробити ці процеси вже в XXI столітті незворотними, і якщо їх наслідки приєднуються до ефекту від викиду парникових газів, на Землі стане тепліше ще на 3-4 градуси [3.] Це призведе до підйому рівня світового океану на 10-60 м, затоплення прибережних регіонів, руйнування більшої частини коралових рифів та їхніх екосистем, а також погано позначиться на сільському господарстві.

Поліпшити екологічну ситуацію та зменшити промислові викиди можливо двома шляхами – застосувати сучасну ефективну технологію, а також застосувати збір, очищення та утилізацію викидів. Найсучасніші технології, що дозволяють очистити повітря до мінімальних концентрацій пилу або інших компонентів, вимагають серйозного фінансування. Тому поетапне зниження викидів має сенс для тих виробництв, які зараз значно перевищують норми за викидами речовин або сполук. До них необхідно підходити програмно з урахуванням того, що екологічні технології та обладнання існують, а програма енергоефективності здатна протягом 3-5 років реалізувати той чи інший захід щодо зниження викидів

Інвестиції металургійних підприємств України у модернізацію виробництва мають вкрай нерівномірний характер. З 2009 року обсяги інвестицій в металургію України кардинально зменшилися. (рис.4).



Рисунок 4. - Інвестиції металургійних підприємств ГМК у 2001-2020 роках, дол/т сталі.

Інвестиції знову почали зростати з 2015 року і у 2019 році цей показник досяг вже 39 дол/т сталі. Слід, однак, визнати, що докорінної модернізації виробництва інвестиції не принесли, вони були вимушеною мірою для підтримки потужностей у робочому стані, а також для покращення екологічного стану виробництва.

According to most scientists, even "safe" warming under the Paris Agreement can make these processes irreversible in the XXI century, and if their effects are combined with the effect of greenhouse gas emissions, the Earth will be warmer by 3-4 degrees [3]. This will raise the world's ocean level by 10-60 m, flood coastal regions, destroy most of the coral reefs and their ecosystems, and have a negative impact on agriculture.

There are two ways to improve the environmental situation and reduce industrial emissions - to use modern efficient technology, as well as to apply the collection, treatment and disposal of emissions. State-of-the-art technologies that allow air to be cleaned to minimum concentrations of dust or other components require significant funding. Therefore, the gradual reduction of emissions makes sense for those industries that now significantly exceed the emission standards for substances or compounds. They need to be approached programmatically, taking into account the fact that environmental technologies and equipment exist, and the energy efficiency program is able to implement one or another measure to reduce emissions within 3-5 years.

Investments of metallurgical enterprises of Ukraine in modernization of production are extremely uneven. Since 2009, investments in metallurgy in Ukraine have dramatically decreased. (Fig. 4).

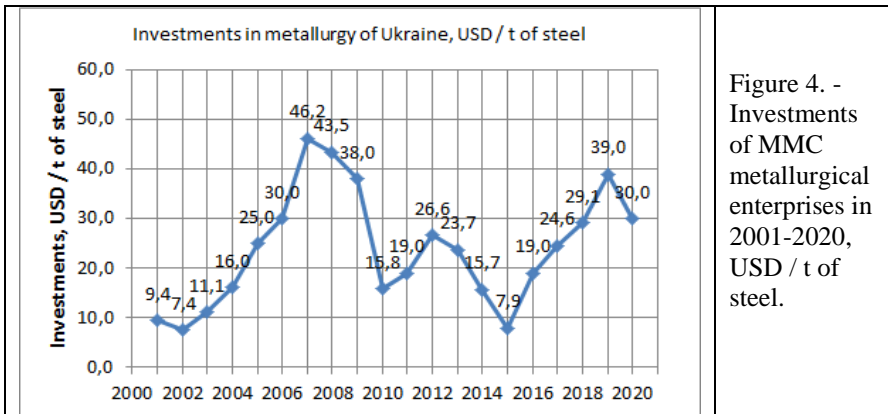


Figure 4. - Investments of MMC metallurgical enterprises in 2001-2020, USD / t of steel.

Investments began to grow again in 2015 and in 2019 this figure reached 39 dollars per ton of steel. It should be recognized, however, that the radical modernization of production did not bring investment, they were forced to maintain capacity in working order, as well as to improve the environmental condition of production.

Аналіз впровадження перспективних процесів металургійного виробництва в ГМК України показав наступне:

Доменне виробництво відноситься до числа пріоритетних і в його модернізацію українські підприємства вкладають значні фінансові кошти. Однак, за кордоном нові доменні печі мають новий стандарт природоохоронних заходів незалежно від регіону.

Розвиток сталеплавильного виробництва пов'язано з використанням безперервного розливання та удосконаленням структури виплавляння сталі. Однак, у ГМК лише третина технологічних схем металургійних процесів відповідає світовим показникам, інша частина застаріла і не має резервів для модернізації.

Стан прокатного виробництва залишився на рівні середини минулого віку і його модернізація не є актуальною, бо Україна перетворилася на постачальника сировини та напівфабрикатів для світової металургії.

У світі екологічні вимоги до металургійних процесів набувають такого рівня, що загрожують перспективам розвитку металургії. Дослідженнями взаємозв'язку екологічних та енергетичних параметрів металургійних процесів показано, що між цими параметрами існує прямий зв'язок. Тому металургійні підприємства України все активніше фінансують екологічні програми. У 2018 році видатки металургійних компаній України на екологічні проекти зросли на 25-30%, а у 2019 році ще на 15-20%. Зростання видатків на охорону довкілля підприємств ГМК у 2018 році випереджало динаміку виробництва. Близько 40% всіх видатків України на охорону довкілля несуть підприємства ГМК.

Оцінювання рівня екологічної безпеки території пов'язане з необхідністю обліку безлічі критеріїв, що мають різні значення і розмірності, оскільки саме поняття екологічної безпеки є комплексним та характеризується великою кількістю частних параметрів. При цьому різні параметри мають різні одиниці виміру, як якісні, так і кількісні. Стан екологічної безпеки може оцінюватися за допомогою бальної оцінки, а рівень забруднення атмосферного повітря може вимірюватися в тонах забруднюючої речовини, що викидаються в повітря від промислових об'єктів та транспорту. Тобто оцінювання рівня екологічної безпеки має бути багатокритерійним.

Для даного дослідження ми застосували методику експертно-математичного оцінювання за допомогою спеціальних психофізичних вербальних числових шкал. У таких випадках найбільш відомою і часто використовуюваною є функція бажаності Харрінгтона [4]. Функція, запропонована Е.С.Харрінгтоном в 1963 році для опису частних критеріїв та обмежень при вирішенні багатокритеріальних задач.

Analysis of the implementation of promising processes of metallurgical production in the MMC of Ukraine showed the following.

Blast furnace production is one of the priorities and Ukrainian enterprises invest significant funds in its modernization. However, abroad, new blast furnaces have a new standard of environmental protection regardless of the region.

The development of steel production is associated with the use of continuous casting and improving the structure of steelmaking. However, in MMC only a third of technological schemes of metallurgical processes correspond to world indicators, the other part is outdated and has no reserves for modernization.

The state of rolling production remained at the level of the middle of the last century and its modernization is not relevant, because Ukraine has become a supplier of raw materials and semi-finished products for world metallurgy.

In the world, environmental requirements for metallurgical processes are gaining such a level that threatens the prospects for the development of metallurgy. Studies of the relationship between environmental and energy parameters of metallurgical processes have shown that there is a direct relationship between these parameters. Therefore, metallurgical enterprises of Ukraine are increasingly financing environmental programs. In 2018, the expenditures of Ukrainian metallurgical companies on environmental projects increased by 25-30%, and in 2019 by another 15-20%. The growth of environmental expenditures of MMC enterprises in 2018 outpaced the dynamics of production. About 40% of all expenditures of Ukraine on environmental protection are borne by MMC enterprises.

Assessing the level of environmental safety of the territory is associated with the need to take into account many criteria that have different meanings and dimensions, because the very concept of environmental safety is complex and is characterized by a large number of parameters. At the same time, different parameters have different units of measurement, both qualitative and quantitative. The state of environmental safety can be assessed by scoring, and the level of air pollution can be measured in tons of pollutants emitted into the air from industrial facilities and transport. That is, the assessment of the level of environmental safety should be multi-criteria.

For this study, we used the method of expert-mathematical assessment using special psychophysical verbal numerical scales. In such cases, the most well-known and frequently used is the Harrington desirability function [4]. The function proposed by E.S. Harrington in 1963 to describe the criteria and constraints in solving multicriteria tasks.

Згортка частних функцій бажаності  $d_i$  в узагальнений критерій  $D$  (узагальнену функцію бажаності) визначається як середнє геометричне частних «бажано» за формулою (1):

$$D = \sqrt[n]{d(1) * d(2) \dots d(n)} \quad (1)$$

Для комплексного оцінювання екологічного впливу виробництва металопродукції в дослідженні використано наступні фізичні параметри роботи металургійного виробництва України: енерговитрати, викиди CO<sub>2</sub>, собівартість, співвідношення цін до прокату, прибуток, можливість експорту, потреби внутрішнього ринку, наявність потужностей, трудові витрати. Шляхом експертного оцінювання за методикою Дельфі [5]. фактичні параметри виробництва металопродукції було переведено у психологічні параметри  $d_i$ . Комплексне оцінювання ефективності виробництва металопродукції здійснювалося за такими видами продукції: Залізна руда, Агломерат, Окатиші, Чавун, Чавун (модерн), Сталь (конвертерна), Сталь (мартен), Електросталь, МБЛЗ, МБЛЗ (тонкий), МБЛЗ + прокат, Сляби, Заготівка, Арматура, Катанка, Конструкційні профілі, Товстий лист, Гарячекатані рулони, Холоднокатані рулони, Оцинкований лист, Залізничні колеса.

Комплексне оцінювання екологічного стану металургійного виробництва показує, що в умовах України виробництво металопродукції має різні оцінки за видами металопродукції (рис.5).

Для прокатною продукції оцінка має значення «задовільно чи добре». Гірше ситуація з виробництвом залізорудної сировини, чавуну та сталі – тут комплексна оцінка показує значення «незадовільно чи задовільно». Ця теза підтверджується тим фактом, що інвестиції металургійних підприємств екологічної спрямованості нині спрямовуються на покращення екологічних показників у зазначених напрямках.

Вибір оптимального шляху екологічного розвитку вимагає пошуку нових рішень для підвищення рівня впровадження екологічних інновацій підприємствами України [6]. Існуючий рівень вирішення екологічних проблем металургійними підприємствами негативно позначається на показниках стану навколишнього середовища, за рівнем якості якого Україна займає 87 місце у світі. Техногенне навантаження в цілому по країні, при істотних регіональних відмінностях, в 4-5 разів перевищує аналогічні показники інших країн. У той же час, на сучасному етапі розвитку суспільства екологія може стати інструментом досягнення стійкого розвитку еколого-економічних виробничих систем. У світі активно розробляються технології виробництва сталі з більш низькими викидами CO<sub>2</sub>.

Convolution of desirability functions  $d_i$  in generalized criterion  $D$  (generalized desirability function) is defined as the geometric mean of the partial «desirable» by formula (1):

$$D = \sqrt[n]{d(1) * d(2) * \dots * d(n)} \quad (1)$$

To comprehensively assess the environmental impact of metal production, the study used the following physical parameters of metallurgical production in Ukraine: energy consumption, CO<sub>2</sub> emissions, cost, rental price ratio, profit, export potential, domestic market needs, capacity, labor costs. By expert evaluation according to the Delphi method [5], the actual parameters of metal production were translated into psychological parameters  $d_i$ . Comprehensive evaluation of the efficiency of metal production was carried out by the following types of products: Iron ore, Agglomerate, Iron ore pellets, Cast iron, Cast iron (modern), Steel (converter), Steel (open-hearth), Electrosteel, MBS, thin (thin), Billet, Fittings, Rod, Structural profiles, Thick sheet, Hot rolled coils, Cold rolled coils, Galvanized sheet, Rail wheels.

A comprehensive assessment of the ecological state of metallurgical production shows that in Ukraine the production of metal products has different assessments by type of metal products (Fig. 5).

For rolled products, the assessment means "satisfactory or good". The situation is worse with the production of iron ore, pig iron and steel - here a comprehensive assessment shows the value of "unsatisfactory" and "satisfactory". This thesis is confirmed by the fact that investments of metallurgical enterprises of ecological orientation are now aimed at improving environmental performance in these areas.

The choice of the optimal way of ecological development requires the search for new solutions to increase the level of implementation of ecological innovations by Ukrainian enterprises [6]. The current level of solving environmental problems by metallurgical enterprises has a negative impact on the indicators of the state of the environment, the level of quality of which Ukraine ranks 87th in the world. Man-made load in the country as a whole, with significant regional differences, 4-5 times higher than similar indicators in other countries. At the same time, at the present stage of development of society, ecology can become a tool for achieving sustainable development of ecological and economic production systems. The world is actively developing technologies for the production of steel with lower CO<sub>2</sub> emissions.

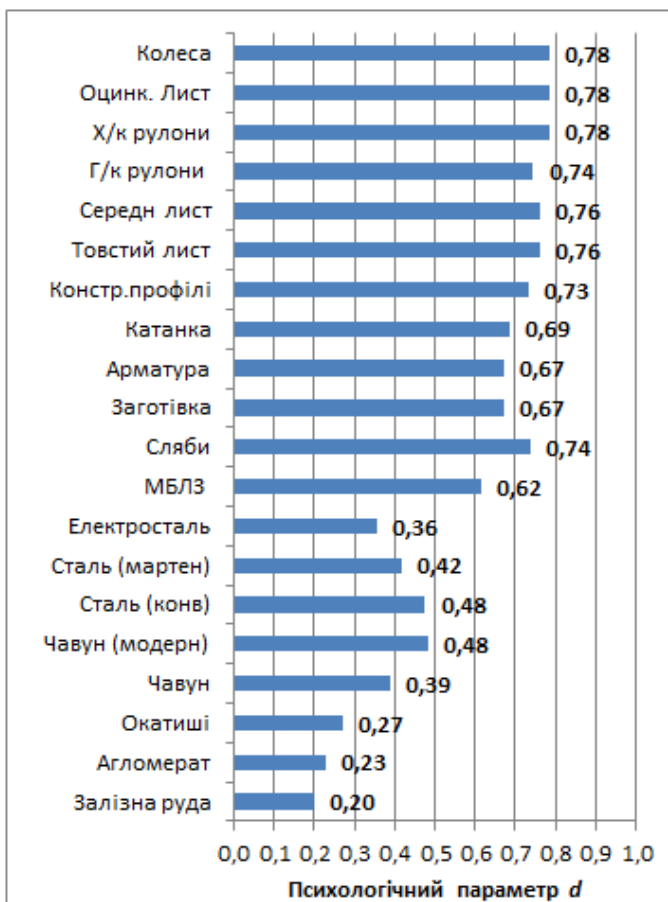


Рисунок 5 Комплексна оцінка екологічного стану виробництва металопродукції в Україні.

Перспектива розвитку металургії України має бути пов'язана з реалізацією нових технічних рішень, зокрема тих розробок, що знаходяться в стадії пошукових досліджень та експериментальних зразків.

Однак поки не існує технологій, що дозволяють зменшити викиди діоксиду вуглецю CO<sub>2</sub> в чорній металургії до рівня, відповідного вимогам Міжнародного енергетичного агентства в період після 2040 року. Тому без використання технологій уловлювання та зберігання CO<sub>2</sub> (CCS) обійтися неможливо.

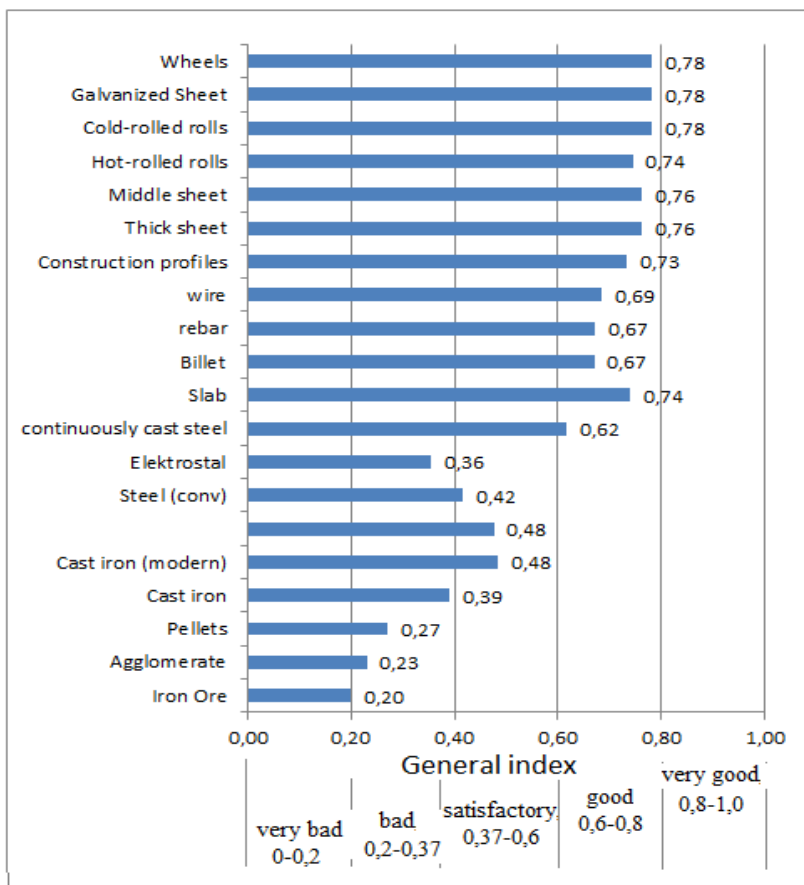


Figure 5 – Comprehensive assessment of the ecological state of metal production in Ukraine.

Prospects for the development of metallurgy in Ukraine should be associated with the implementation of new technical solutions, in particular those developments that are in the stage of exploratory research and experimental samples.

However, there are no technologies to reduce carbon dioxide emissions in ferrous metallurgy to a level that meets the requirements of the International Energy Agency in the period after 2040. Therefore, it is impossible to do without the use of CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) technologies.



Вирішення даної проблеми вимагає створення більш радикальних інноваційних технологій, масштабного впровадження технологій уловлювання та зберігання діоксиду вуглецю CCS.

Розглянемо деякі ключові металургійні технології, що мають перспективи бути реалізованими до 2050 року

Доменна плавка з рециркуляцією колошникового газу (Top Gas Recycling, TGR). Технологія передбачає очищення колошникового газу від діоксиду вуглецю та рециркуляцію газової суміші CO + H<sub>2</sub> + N<sub>2</sub> в фурми доменної печі [7]. Розрахунки та експериментальні дослідження показують, що обсяги викидів CO мають скоротитися на 24% при ступені рециркуляції газової суміші 90%, а витрата коксу знизиться на 25%.

Технологія рідкофазного відновлення H<sub>2</sub>sarna з використанням циклонного конвертера (Cyclon Converter Furnace, CCF), Процес CCF пройшов випробування на пілотній установці продуктивністю 15-20 т руди/годину. Залізну руду та кисень вдували в циклонний конвертер і спалювали в умовах відновної газової суміші. Розплав частково відновленої руди мав температуру близько 14500С. І хоча цей агрегат виділяє більше CO<sub>2</sub>, ніж ДП, сукупні обсяги викидів при його роботі на 20% є нижчими, ніж при використанні доменної печі завдяки відсутності коксування та агломерації [8].

Установка Finex реалізує розроблену (1992 р) технологію виробництва чавуну на основі прямого використання рудної дрібниці і некоксивного вугілля. Установа складається з шахтної печі та плавильника-газифікатора. Finex, включає каскад реакторів з псевдозрідженим шаром для підігріву і відновлення матеріалів. Застосування установки брикетування дозволяє утилізувати дрібну шихту. Кращий рівень витрат палива складає 97% аналогічного показника при доменній плавці, а рівень викидів CO<sub>2</sub> у викидах знижено до 90% [9].

Удосконалення технології виробництва сталі в електропечях. Згідно з прогнозами до 2050 р тільки 20% електроенергії буде вироблятися з використанням викопного палива (у 2011 р цей показник становив 70%). Частка електросталі в світовому сталеплавильному виробництві має зрости у 2030 році до 37%, а до 2050 року – до 40%. Тому реалізація такого сценарію запобігання зміни клімату залежить від наявності достатньої кількості металобрухту.

Слід відмітити нову технологію, в якій процес електролізу розплавленого оксиду суміщений із застосуванням анода з хромистого сплаву. Використання електролізу для добування заліза з електроліту має певні труднощі у зв'язку з необхідністю вирішувати такі проблеми, як повторне окислення продукту і нестабільність електрода при температурах понад 1540<sup>0</sup>С.

Solving this problem requires the creation of more radical innovative technologies, large-scale implementation of CCS technologies and storage of carbon dioxide.

Consider some key metallurgical technologies that have the potential to be implemented by 2050.

Blast furnace smelting with flue gas recirculation (Thor Gas Recycling, TGR). The technology involves the purification of grate gas from carbon dioxide and the recirculation of the gas mixture  $\text{CO} + \text{H}_2 + \text{N}_2$  in the lances of the blast furnace [7]. Calculations and experimental studies show that CO emissions should be reduced by 24% with a gas mixture recirculation rate of 90%, and coke consumption will be reduced by 25%.

Hlsarna liquid-phase reduction technology using a Cyclon Converter Furnace (CCF), The CCF process was tested on a pilot plant with a capacity of 15-20 tons of ore / hour. Iron ore and oxygen were injected into a cyclone converter and burned in a reducing gas mixture. The melt of partially reduced ore had a temperature of about 14500C. And although this unit emits more CO<sub>2</sub> than BF, the total emissions during its operation are 20% lower than when using a blast furnace due to the lack of coking and agglomeration [8].

The Finex plant implements the technology of pig iron production developed (1992) on the basis of direct use of ore fines and non-coking coal. The installation consists of a shaft furnace and a gasifier. Finex, includes a cascade of reactors with a fluidized bed for heating and recovery of materials. Application of the briquetting installation allows to utilize a small charge. The best level of fuel consumption is 97% of the same indicator in blast furnace smelting, and the level of CO<sub>2</sub> emissions in emissions is reduced to 90% [9].

Improving the technology of steel production in electric furnaces. According to forecasts, by 2050 only 20% of electricity will be produced using fossil fuels (in 2011 this figure was 70%). The share of electric steel in world steelmaking should increase to 37% in 2030 and to 40% by 2050. Therefore, the implementation of such a scenario to prevent climate change depends on the availability of sufficient scrap metal.

Note the new technology, in which molten oxide electrolysis process is combined with the use of chromium alloy anode. The use of electrolysis to extract iron from the electrolyte has some difficulties due to the need to solve problems such as re-oxidation of the product and the instability of the electrode at temperatures above 1540<sup>0</sup>C. However, this approach can be applied only if the fuel does not use materials containing carbon.

Технологія отримання чавуну (Flash Ironmaking Process, FIP), в якій відновником є водень. При виробництві чавуну даним способом обсяги викидів CO<sub>2</sub> можуть скоротитися на 96% у порівнянні з аналогічним показником для доменного процесу [10]. Проте на даний час у світі відсутні економічно й екологічно ефективні технології отримання водню в кількості, достатній для виплавки чавуну. Є й інші перешкоди для реалізації технології FIP в найближчому майбутньому, пов'язані, зокрема, з транспортуванням та зберіганням великої кількості водню. Тому використання водню необхідно розглядати тільки як варіант зменшення промислових викидів CO<sub>2</sub> у перспективі.

За останні 55 років загальносвітові питомі витрати енергії у чорній металургії зменшилися в середньому на 60%, тобто на багатьох сучасних підприємствах ресурс енергозбереження за рахунок застосування відомих технологій є практично вичерпаним [11]. Однак для окремих виробників сталі можливості економії енергії варіюються в широкому діапазоні. Зокрема, в Україні за останні 10 років споживання коксу у доменних печах скоротилося майже на 19,5% за рахунок застосування пиловугільного палива. Загальні витрати енергоресурсів під час доменної плавки зменшилися на 6%, що означає аналогічне скорочення викидів парникових газів.

Таким чином, окрім застосування технологій уловлювання та зберігання CO<sub>2</sub> (CCS) значним резервом зменшення викидів парникових газів є удосконалення технологій металургійного виробництва. На реалізацію цього напрямку поліпшення екологічної ситуації спрямовані і розробки Інституту чорної металургії НАН України. Одним з головних завдань Інституту чорної металургії ім.З.І.Некрасова (ІЧМ), як інституту Національної академії наук України, є науково-технічний супровід перспективного розвитку однієї з базових галузей економіки України - чорної металургії. Для цього використовується комплексний підхід проведення наукових досліджень, що дозволяє охопити всі основні переділи чорної металургії - від підготовки сировини до доменної плавки та до термічної обробки готового прокату.

Вплив розробок ІЧМ на екологічні параметри металургійного виробництва здійснюється за такими напрямками:

зменшення питомих технологічних енерговитрат у доменному, сталеплавильному та прокатному виробництвах. Зменшення питомих енерговитрат на 0,1 тунт/т чавуну дозволяє забезпечити зменшення викидів парникового газу на 0,18 т CO<sub>2</sub>/т продукції;

розроблення нових екологічно безпечних технологій металургійного виробництва;

Iron production technology (Flash Ironmaking Process, FIP), in which the reducing agent is hydrogen. In the production of pig iron in this way, CO<sub>2</sub> emissions can be reduced by 96% compared to the same indicator for the blast furnace process [10]. However, currently there are no economically and environmentally efficient technologies in the world to obtain enough hydrogen to smelt iron. There are other obstacles to the implementation of FIP technology in the near future, related, in particular, to the transportation and storage of large amounts of hydrogen. Therefore, the use of hydrogen should be considered only as an option to reduce industrial CO<sub>2</sub> emissions in the future.

Over the past 55 years, the specific energy consumption in ferrous metallurgy has decreased by an average of 60% and in many modern enterprises the resource of energy saving through the use of known technologies is almost exhausted [11]. However, for individual steel producers, energy saving opportunities vary widely. In particular, in Ukraine for the last 10 years the consumption of coke in blast furnaces has decreased by almost 19.5% due to the use of pulverized coal fuel. Total energy consumption during blast furnace smelting decreased by 6%, which means a similar reduction in greenhouse gas emissions.

Thus, in addition to the use of CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) technologies, a significant reserve for reducing greenhouse gas emissions is the improvement of metallurgical production technologies. Developments of the Iron and Steel Institute (ISI) of the National Academy of Sciences of Ukraine are also aimed at implementing this direction of improving the ecological situation. One of the main tasks of the Iron and Steel Institute, as an institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, is scientific and technical support of perspective development of one of the basic branches of Ukraine's economy - ferrous metallurgy. To do this, a comprehensive approach to research is used, which allows to cover all the main redistributions of ferrous metallurgy - from raw material preparation to blast furnace smelting and heat treatment of finished products.

The impact of the Iron and Steel Institute developments on the environmental parameters of metallurgical production is carried out in the following areas:

- reduction of specific technological energy consumption in blast furnace, steel and rolling industries. Reduction of specific energy consumption by 0.1 t/t of pig iron allows to reduce greenhouse gas emissions by 0.18 tons of CO<sub>2</sub> / t of products;

- development of new ecologically safe technologies of metallurgical production;

розроблення моделей та впровадження систем керування технологічними процесами у доменному, сталеплавильному та прокатному виробництвах, що дозволяє забезпечити стабільність технологічних процесів та оптимізувати витрати енергоресурсів на виробництво продукції. Екологічний ефект забезпечується стабільною роботою виробництва, поліпшенням екологічних показників та підвищенням якості металопродукції;

розроблення технологій використання вторинних ресурсів та відходів в умовах металургійного виробництва.

На підставі результатів розрахунково-аналітичного експерименту визначено умови, що під час доменної плавки забезпечують підвищення ступеня використання газу на 1,0-2,5% за рахунок поліпшення міцності агломерату та збільшення відновлюваності доменної шихти.

Зупиняючись на проблемах зниження рівня енерговитрат в чорній металургії слід наголосити на необхідності реалізації такої наукової розробки, як використання пиловугільного палива (ПВП) в доменних печах. Така технологія вперше в світовій практиці була розроблена в Інституті чорної металургії НАН України під керівництвом академіка З.І.Некрасова і випробувана на доменних печах МК «Запоріжсталь» в 60-х роках минулого століття. Однак, випередивши свій час, ця технологія не встояла під натиском дешевого природного газу. На теперішній час ІЧМ проводить дослідження з підвищення ефективності застосування ППВ на більшості металургійних підприємств України.

У напрямку підвищення якості чавуну Інститут чорної металургії є головною організацією з наукової і технологічної розробки проблеми позадоменного рафінування рідкого чавуну. Розроблено процес видалення сірки з чавуну світового класу та продовжується розширення його застосування на зарубіжних та вітчизняних підприємствах. За 20 років на 36 металургійних підприємствах споруджено і освоєно 68 комплексів десульфурації та очищення чавуну від шлаку. Освоєння цієї розробки забезпечує можливість виплавки сталеплавильними цехами високоякісних і конкурентоспроможних марок сталі та знижує витрати при виплавці сталі.

У галузі сталеплавильного виробництва Інститутом розроблена технологія конвертерної плавки сталі, що не має аналогів у світовій практиці. Основою технології є підведення до системи «метал-шлак» низьковольтного електричного потенціалу. Результати випробування нової технології свідчать про стійке поліпшення основних технологічних показників плавки (вихід рідкої сталі, питома витрата чавуну, температура розплаву), що визначають величину витратних і енергетичних показників, а, отже, собівартість сталі, економічний і екологічний ефект.

development of models and implementation of process control systems in blast furnace, steel and rolling industries, which allows to ensure the stability of technological processes and optimize energy costs for production. The ecological effect is provided by stable work of production, improvement of ecological indicators and increase of quality of metal products;

development of technologies for the use of secondary resources and waste in the conditions of metallurgical production.

Based on the results of the calculation-analytical experiment, the conditions are determined that during blast furnace smelting provide an increase in the degree of gas utilization by 1.0-2.5% by improving the strength of the sinter and increasing the recoverability of the blast furnace charge.

Focusing on the problems of reducing energy consumption in ferrous metallurgy, it should be emphasized the need to implement such scientific developments as the use of pulverized coal (PVP) in blast furnaces. This technology was first developed in the world practice at the Iron and Steel Institute under the leadership of Academician Z.I. Nekrasov and tested on blast furnaces of Zaporizhstal in the 1960s. However, ahead of its time, this technology did not withstand the pressure of cheap natural gas. Currently, the Iron and Steel Institute is conducting research to improve the efficiency of the use of PIP at most metallurgical enterprises in Ukraine.

In the direction of improving the quality of cast iron, the Institute of Ferrous Metallurgy is the main organization for scientific and technological development of the problem of off-domain refining of liquid cast iron. The process of sulfur removal from world-class cast iron has been developed and its application at foreign and domestic enterprises continues to expand. For 20 years, 68 complexes of desulfurization and purification of cast iron from slag have been built and mastered at 36 metallurgical enterprises. The development of this development provides the possibility of smelting steel mills of high quality and competitive steel grades and reduces the cost of steel smelting.

In the field of steelmaking, the Institute has developed a technology of converter smelting of steel, which has no analogues in world practice. The basis of the technology is the supply of low-voltage electric potential to the "metal-slag" system. The test results of the new technology indicate a steady improvement of the main technological indicators of smelting (liquid steel yield, specific consumption of cast iron, melt temperature), which determine the value of consumption and energy indicators, and, consequently, steel costs, economic and environmental effects.

У галузі прокатного виробництва Інститут є провідною науковою організацією, що займається одночасно теоретичними і промисловими дослідженнями динамічних процесів в реальних лініях приводів прокатних станів. На підставі результатів досліджень вирішуються завдання як створення і реалізації нових, високоефективних технологій (включаючи енерго і ресурсозберігаючі), так і обґрунтування напрямків модернізації, реконструкції прокатних станів, встановлення і повного використання резервів діючого устаткування, вибір складу і технічних характеристик нового. Показано, що використання енергозберігаючого обладнання дозволяє забезпечити ефективне збереження температури розкату та виробництво прокату високої якості, зменшити витрати енергоносіїв та поліпшити екологічні показники виробництва.

Інститут має значний доробок у напрямку технологій виробництва і термічного зміцнення високоміцних залізничних коліс та економнолегованого сталевого металопрокату. Показано, що використання економно легованих сталей з відповідною технологією термічної обробки дає змогу забезпечити високі механічні властивості прокату, зменшити енерговитрати та поліпшити екологічні показники виробництва.

У напрямку утилізації техногенних відходів Інститутом накопичено значний досвід з брикетування дрібнофракційних матеріалів, що дозволяє виробляти в безперервному циклі брикети однакових розмірів, форм і маси. Створено оригінальну конструкцію малогабаритних, з невеликою металоємністю (до 6500 кг) валкових пресів продуктивністю до 25 т / год (в залежності від виду шихти). Преси відрізняються простотою, компактністю та зручностями в експлуатації. Подальше залучення брикетованих відходів у металургійне виробництво дозволяє реалізувати ідеологію комплексного вирішення спеціалізованих завдань в області екології та створення промислових об'єктів для виробництва брикетів.

### **Висновок**

Таким чином, дослідження показують, що викиди парникових газів в чорній металургії на ~95% обумовлені застосуванням викопних палив. Скоротити обсяг таких викидів у середньостроковій перспективі можливо шляхом підвищення енергоефективності за рахунок впровадження кращих доступних технологій ВАТ (Best Available Technologies), збільшення частки виробництва вторинної сталі, розробки та реалізації альтернативних методів виплавляння чавуну. У довгостроковій перспективі необхідне розроблення та застосування технологій уловлювання і зберігання CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage, CCS).

In the field of rolling production, the Institute is a leading scientific organization engaged in both theoretical and industrial research of dynamic processes in real lines of drives of rolling mills. Based on the research results, the tasks of creating and implementing new, highly efficient technologies (including energy and resource-saving) and substantiation of modernization, reconstruction of rolling mills, installation and full use of existing equipment reserves, selection of new equipment and technical characteristics are solved. It is shown that the use of energy-saving equipment allows to ensure effective preservation of rolling temperature and production of high quality rolled products, reduce energy costs and improve environmental performance.

The Institute has significant achievements in the direction of production technologies and thermal strengthening of high-strength railway wheels and economically alloyed steel. It is shown that the use of economically alloyed steels with appropriate heat treatment technology allows to ensure high mechanical properties of rolled products, reduce energy consumption and improve environmental performance.

In the direction of utilization of technogenic waste the Institute has accumulated considerable experience in briquetting of fine-grained materials, which allows to produce in a continuous cycle briquettes of the same size, shape and weight. The original design of small-sized, with small metal capacity (up to 6500 kg) roller presses with a productivity up to 25 t / h (depending on the type of charge) is created. The presses are simple, compact and easy to operate. Further involvement of briquetted waste in metallurgical production allows to implement the ideology of complex solution of specialized problems in the field of ecology and creation of industrial facilities for the production of briquettes.

#### Conclusion

Thus, studies show that greenhouse gas emissions in ferrous metallurgy are ~ 95% due to the use of fossil fuels. Reducing such emissions in the medium term is possible by increasing energy efficiency through the introduction of best available technologies (Best Available Technologies), increasing the share of secondary steel production, development and implementation of alternative methods of pig iron smelting. In the long run, it is necessary to develop and apply technologies for capturing and storing CO<sub>2</sub> (Carbon Capture and Storage, CCS).



### Перелік посилань

1. *Укрметалургпром*. Київ, 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://ukrmetprom.org>.
2. *Парижское соглашение по климату не спасет землю от глобального потепления – ученые*. 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://racurs.ua/n109141-parijskoe-soglashenie-po-klimatu-ne-spaset-zemlu-ot-globalnogo-potepeniya-uchenye.html>.
3. *Европейские спутники составят карты глобальных выбросов CO<sub>2</sub>*. 2020. [Електронний ресурс]. Режим доступа: <https://vokrugsveta.ua/science/evropejskie-sputniki-sostavyat-karty-globalnyh-vybrosov-so2-03-08-2020>
4. *Harrington E.C.* The desirable function // *Industrial Quality Control*. 1965, V.21, №10. P. 124-131.
5. *Дельфийский метод* // Большой энциклопедический словарь. 2020.
6. *Антипин В.Г., Зиновьева Н.Г.* Состояние и некоторые перспективы мировой черной металлургии // *Металлургическая и горно-рудная промышленность*. 2013. №3. С.2-19.
7. *INDCs as communicated by Parties*. [Electronic resource]. Retrieved from: <http://www4.unfccc.int/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>.
8. *Croezen H., Korteland M.* Technological developments in Europe: A long- term view of CO<sub>2</sub> efficient manufacturing in the European region. II Commissioned by Climate Action Network Europe CAN, CE Delft, 2010.
9. *Yi S. H., Lee H. G.* The recent update of innovative ironmaking process FINEX // *Proceedings of the 2nd International Conference Advances in Metallurgical Processes & Materials*, June 04-05 2015, Kyiv.
10. *Sohn H.Y., Mohassab Y.* Development of a Novel Flash Ironmaking Technology with Greatly Reduced Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2016. № 3. P. 216-227.
11. *Sustainability - indicators*. [Electronic resource]. Retrieved from: <https://www.worldsteel.org/statistics/Sustainability- indicators.html>.

**Посилання для цитування:** *Бабаченко О.І., Тубольцев Л.Г.*

Технологічний розвиток чорної металургії України на середньострокову і довгострокову перспективу. // «Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2019. - Вип.33. – С.4-29. (In English, In Ukrainian).

DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-4-29

*Стаття надійшла до редакції збірника 19.10.2020 року,  
пройшла внутрішнє і зовнішнє рецензування.  
(Протокол засідання редакційної колегії №3 від 22 грудня 2020 р.)*

## References

1. Ukrmetalurhprom [Ukrmetprom]. (2020). Kyiv. Retrieved from: <http://ukrmetprom.org>. [In Russian].
2. Parizhskoye soglasheniye po klimatu ne spaset zemlyu ot globalnogo potepleniya - uchenyye [Paris climate agreement won't save earth from global warming - scientists]. 2018. <https://racurs.ua>. Retrieved from: <https://racurs.ua/n109141-parijskoe-soglashenie-po-klimatu-ne-spaset-zemlu-ot-globalnogo-potepleniya-uchenye.html>. [In Russian].
3. Yevropeyskiye sputniki sostavyat karty globalnykh vybrosov CO<sub>2</sub> [European satellites to map global CO<sub>2</sub> emissions]. 2020. <https://vokrugsveta.ua>. Retrieved from <https://vokrugsveta.ua/science/evropejskie-sputniki-sostavyat-karty-globalnyh-vybrosov-so2-03-08-2020>. [In Russian].
4. Harrington E.C. (1965). The desirable function. *Industrial Quality Control*, 1965, Vol. 21, 10, 124-131.
5. Delfiyskiy metod [Delphic method]. (2020). *Bolshoy entsiklopedicheskiy slovar (Russkiy) [Big Encyclopedic Dictionary (Russian)]*. [In Russian].
6. Antipin V.G. & Zinovyeva N.G. (2013). Sostoyaniye i nekotoryye perspektivy mirovoy chernoy metallurgii [State and some prospects of the world ferrous metallurgy]. *Metallurgicheskaya i gorno-rudnaya promyshlennost [Metallurgical and mining industry]*, 2013, 3, 2-19. [In Russian].
7. INDCs as communicated by Parties. <https://www4.unfccc.int>. Retrieved from: <http://www4.unfccc.int/submissions/indc/Submission%20Pages/submissions.aspx>.
8. Croezen H. & Korteland M. (2010). Technological developments in Europe: A long- term view of CO<sub>2</sub> efficient manufacturing in the European region. *II Commissioned by Climate Action Network Europe CAN*, CE Delft, 2010.
9. Yi S-H. & Lee H-G. (2015). The Recent Update of Innovative Ironmaking Process FINEX. *Proceedings of the 2nd International Conference Advances in Metallurgical Processes & Materials (June 04-05 2015)*. Kyiv.
10. Sohn H.Y. & Mohassab Y. (2016). Development of a Novel Flash Ironmaking Technology with Greatly Reduced Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2016, 3, 216-227. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0054-8>
11. Sustainability indicators. <https://www.worldsteel.org>. Retrieved from: <https://www.worldsteel.org/statistics/Sustainability- indicators.html>.

**For citation:** Babachenko O.I., Tubol'tsev L.H. Tekhnolohichnyy rozvytok chornoyi metalurhiyi Ukrainy na seredn'ostrokovu i dovhostrokovu perspektivu. [Technological development of ferrous metallurgy of Ukraine in the medium and long term.]. «Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii». [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy.] 2020, 34. 4-29. ((In English, In Ukrainian). DOI 10.52150/2522-9117-2020-34-4-29

*The article was received by the editors of the collection on October 19, 2020,  
passed internal and external review.  
(Record of the meeting of the editorial board of collection No. 3 dated  
December 22, 2020)*

«Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії». – 2020. – Випуск 34  
«Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoy metallurgii». – 2020. – Vypusk 34  
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2020. – Collection 34