

С.И. Семькин, Т.С. Голуб, П.Г. Прокопенко

## СТЕНДОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ГАЗОВОГО КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ПОТОКА

*В работе изложены результаты стендовых исследований по оценке количества ионов (по величине силы ионного тока), формирующиеся при высоковольтной активизации газовых струй, содержащих кислород, при их подаче через кислородную фурму. Установлено, что в процессе активизации на срезе сопла фурмы образуется кистевой разряд, а внутри фурмы на электроде – тлеющий разряд, способствуют формированию в потоке газа заряженных частиц кислорода – ионов положительного и отрицательного знака, сила тока которых имеет ярко выраженную экспоненциальную зависимость от расстояния до источника их образования (электрода) независимо от давления газа или уровня содержания в нем кислорода. Выявлено, что углубление электрода на величину 10 мм способствует максимизации значений ионного тока на близких расстояниях до среза сопла. А при активизации кислородного потока количество ионов на начальном участке струи в 4-5 раз больше, чем при активизации воздуха при одинаковом продувочном давлении, что, вероятно, связано с количеством кислорода в продувочном газе, который превращается в ионы.*

**Ключевые слова:** продувочной фурмы, кислородный и кислородсодержащих поток, высоковольтный разряд, ионный ток

### Постановка проблемы

Существующие в настоящее время классические методы продувки ванны кислородом через верхние фурмы, в том числе в комбинации с донным перемешиванием различными газами, нуждаются в совершенствовании и модернизации с целью обеспечения как ресурсосбережения, так и соблюдения постоянно ужесточающихся экологических норм. В мировой практике все чаще обращаются к нетрадиционным способам интенсификации процессов производства стали, расширяющим возможности существующих процессов и не требующим значительных капиталовложений и кардинальных изменений в цикле производства.

Известно, что для осуществления протекания окислительно-восстановительных реакций в процессе кислородного рафинирования необходимо наличие подвижных заряженных частиц – ионов, как компонентов металлического расплава, так и, в первую очередь, кислорода. Следовательно, новым актуальным направлением в модернизации существующих конвертерных процессов может стать применение в конвертерном производстве электрофизически активизированных газовых струй, содержащих, кислород.

### Анализ последних исследований и публикаций, постановка цели

В обычном состоянии все газы почти полностью состоят из нейтральных атомов или молекул [1]. Такой малой доли подвижных частиц, способных переносить заряды, недостаточно для возникновения сколь-нибудь заметного электрического тока для осуществления активизации. Чтобы газ стал электропроводящим, в нем необходимо создать большое количество свободных заряженных частиц, превратив нейтральные молекулы (атомы) в ионы и обеспечив наличие свободных электронов [1-5]. Это можно сделать двумя путями: «внешним», когда заряженные частицы создаются действием какого-нибудь внешнего источника (его называют ионизатором), формирующим самостоятельный разряд, либо «внутренним», когда заряженные частицы создаются в газе под действием электрического поля, которое затем приводит их в движение и создаст электрический ток – самостоятельный разряд. Установлено, что при определенных условиях образуются как отрицательно заряженные газовые ионы, например:  $\text{H}^-$ ,  $\text{O}^-$ ,  $\text{O}^{2-}$  и другие, так и при иных условиях – положительные, например:  $\text{O}^+$ ,  $\text{O}^{2+}$  и другие [1-5].

Известны многочисленные публикации о способах и устройствах по созданию ионизированного газового потока различного состава (плазменная металлургия) [6-10], однако они базируются на термической плазме, для создания которой требуются значительные электрические вложения.

Основой предлагаемого способа является предварительная активизация кислородного потока за счет электрофизических воздействий мощностью на два – три порядка ниже, что приведет к образованию молекул озона и определенной доли ионов кислорода до момента его взаимодействия с расплавом. Это должно существенно повысить активность газового потока [11], снизить энергетический барьер протекания окислительных реакций и приведет к более полному их протеканию в реакционных зонах в условиях более низких температур, присущих обычным условиям, что приведет к повышению коэффициента усвоения кислорода ванной, сокращая потери кислорода в виде окислов и пыли.

Ионизированный газовый поток может генерироваться в дуговых, высокочастотных и сверхвысокочастотных плазмотронах в тлеющем и коронном разрядах, в мощных лазерах [1-10]. Однако предпочтительным направлением в создании средств активизации (ионизации) потока газа применительно к условиям металлургического производства является способ активизации газового потока высоковольтным разрядом путем создания кистевого или тлеющего электрического разряда на поверхности электрода. Это обусловлено большей простотой реализации данного способа, возможностью широкого регулирования параметров активизации потока, энергетической эффективностью процесса, стабильностью и надежностью в работе.

Целью данной работы было изучение возможности и степени активизации кислородсодержащего газового потока за счет создания кистевого или тлеющего электрического разряда.

### Методика проведения исследований

В рамках проведенной работы на лабораторном участке отдела Физико-технических проблем металлургии стали ИЧМ НАНУ был создан стенд для исследования высоковольтной активизации газового потока, истекающего из продувочной фурмы, при свободном распространении (рис. 1). Основным элементом разработанного стенда был прозрачный сосуд емкостью 25 литров, выполненный из карболита, герметично закрепленный на созданной для проведения исследований по активизации газовых струй кислородной фурме со сменным сопловым наконечником.



Рисунок 1 – Функциональная схема стенда физического моделирования

Для создания активизации кислородной струи на выходе из фурмы стенд был оборудован электрической схемой и высоковольтным источником, а фурма оснащена электрически изолированным электродом, формирующим в газовом потоке тлеющий и коронный разряды.

Исследования по установлению закономерностей образования и распространения ионов при продувке кислородсодержащим газом были выполнены с использованием зондового метода Ленгмюра [12]. Измерительная система (рис. 2) включала: измерительный зонд, источник напряжения и регистрирующий изменение силы тока в цепи гальванометр. Количество ионов определенного знака определялось по величине ионного тока при установке соответствующей полярности потенциала на зонде.



1- пластины датчика, 2- – блок питания датчика,  
3 – гальванометр (наноамперметр), 4 – наконечник продувочной фурмы  
Рисунок 2 – Измерительная схема оценки степени активизации газа  
с применением зонда Ленгмюра

В ходе опытов электрод, осуществляющий воздействие на газовый поток, располагали по срезу сопла и при заглублении на расстояниях 5, 10, 15 и 20 мм. Продувку осуществляли технически чистым кислородом (чистотой 99,3%) и воздухом в качестве кислородсодержащего газа при наборе фиксированных давлений от 0,05 до 0,2 МПа.

Замеры количества формируемых положительно и отрицательно заряженных ионов при высоковольтной активизации газового потока были проведены по длине струи на расстояниях от среза сопла фурмы 10-100 мм с интервалом 5 мм (минимальная величина обусловлена возможностью корректного обеспечения замеров без наводки помех от высоковольтного источника тока) по три замера на каждый опыт.

### Изложение основного материала исследований

В ходе проведения экспериментов установлено, что при подаче на электрод высоковольтного напряжения и при потакании вдоль него продувочного газа между электродом и кромкой сопла формировался ярко выраженный кистевой разряд и ощущался запах озона. При этом запах озона ощущался и в случае отсутствия кистевого разряда на выходе из сопла при заглублении электрода внутрь фурмы, что, по-видимому, было связано с формированием вдоль электрода внутри фурмы тлеющего разряда.

Было отмечено, что при продувке воздухом регистрация ионов на расстоянии менее 10 миллиметров от наконечника продувочной фурмы не представлялась технически возможной, в связи с высоким уровнем электрических помех, создаваемых высоким потенциалом на электроде в разрядном промежутке, существенно превышающих величину потенциала, необходимого по методике Ленгмюра (30 кВ против необходимых 100 В). А в случае продувки кислородом это пороговое значение было на уровне 15 мм. Тем не менее, на исследованных расстояниях от среза сопла установлена ярко выраженная экспоненциальная зависимость количества ионов от расстояния до источника их образования (электрода) с высокой корреляционной связью не зависимо от используемых в

исследовании газов: с увеличением расстояния до среза сопла от 10-15 мм до величины порядка 30 мм сила тока снижалась сначала интенсивно, а при дальнейшем отдалении от наконечника на расстояние от 30 мм до 100 мм изменение силы тока имело более плавный характер.

Отмеченный в экспериментах резкий спад уровня ионного потока при распространении струи на расстоянии порядка 30 мм, вероятно, свидетельствует о формировании на этом расстоянии молекул озона путем воздействия части ионизированных частиц на молекулы кислорода.

Также установлено, что количество положительных ионов (величина силы тока при отрицательной полярности на датчике) не зависимо от продувочного газа было больше, чем отрицательных, что особенно проявлялось на начальном участке струи возле среза сопла (на величину 15-30 %).

Результаты замеров ионного тока при различных расположениях электрода относительно среза сопла фурмы и различном давлении продувочного газа для замеров при наибольшем приближении к наконечнику фурмы (10-15 мм) и наибольшем исследованном удалении по длине струи на расстояние 100 мм, а также на расстоянии, соответствующем резкому снижению уровня значений силы ионного тока – 30 мм, представлены в усредненном виде в таблице 1 для условий продувки кислородом и в таблице 2 для условий продувки воздухом.

Таблица 1

Средний уровень зарегистрированного ионного тока на зонде при различных положениях электрода относительно среза сопла при продувке кислородом (давление газа 0,05-0,2 МПа)

№ п.п.	Положение электрода относительно среза сопла, мм	Величина ионного тока, нА при замере					
		Отрицательных ионов на расстоянии, мм			Положительных ионов на расстоянии, мм		
		10	30	100	10	30	100
1	0	640-1010	190-210	63-104	800-1223	210-277	60-120
2	-5 <sup>*)</sup>	520-624	124-178	70-96	700-802	136-200	77-98
3	-10	1200-2300	76-150	27-75	2180-3250	82-169	42-93
4	-15	88-64	37-32	22-19	125-120	51-47	25-21
5	-20	20-5	8-7	5-2	23-7	12-7	9-7

<sup>\*)</sup> минус означает заглубление электрода внутрь фурмы

Таблица 2

Средний уровень зарегистрированного ионного тока на зонде при различных положениях электрода относительно среза сопла при продувке воздухом (давление газа 0,05-0,2 МПа)

№ п.п.	Положение электрода относительно среза сопла, мм	Величина ионного тока, нА при замере					
		Отрицательных ионов на расстоянии, мм			Положительных ионов на расстоянии, мм		
		10	30	100	10	30	100

1	0	160-240	94-110	58-98	160-240	96-130	60-120
2	-5 <sup>*)</sup>	130-160	60-90	60-90	140-160	65-93	62-94
3	-10	250-650	38-74	22-72	400-1000	40-80	40-90
4	-15	27-22	18-17	18-17	34-25	28-25	20-21
5	-20	3-1	2-1	1-0	16-5	14-5	7-5

<sup>\*)</sup> минус означает заглубление электрода внутрь фурмы

Установлено, что заглубление электрода на величину 10 мм способствовало увеличению значений регистрируемого ионного тока на близких расстояниях к срезу сопла до максимальных величин. По-видимому, такое расположение электрода оптимально для создания как кистевого разряда между концом электрода и кромкой сопла, так и тлеющего разряда внутри фурмы на электроде, создающих ионный ток. Дальнейшее заглубление электрода характеризовалось отсутствием кистевого разряда и привело к резкому спаду количества сформированных ионов. Это свидетельствует о возможной рекомбинации значительной части ионов, сформированных тлеющим разрядом, внутри фурмы при контакте их с продувочным газом и со стенками.

В качестве примера на рис. 3 представлены результаты замера ионного тока положительной полярности по длине струи для продувки кислородом и воздухом при расположении электрода на глубине 10 мм. Отмечено, что по мере увеличения давления продувочного газа от 0,05 МПа до 0,2 МПа величина ионного тока увеличивалась, что особенно проявлялось на начальных участках струи (до 50 мм).

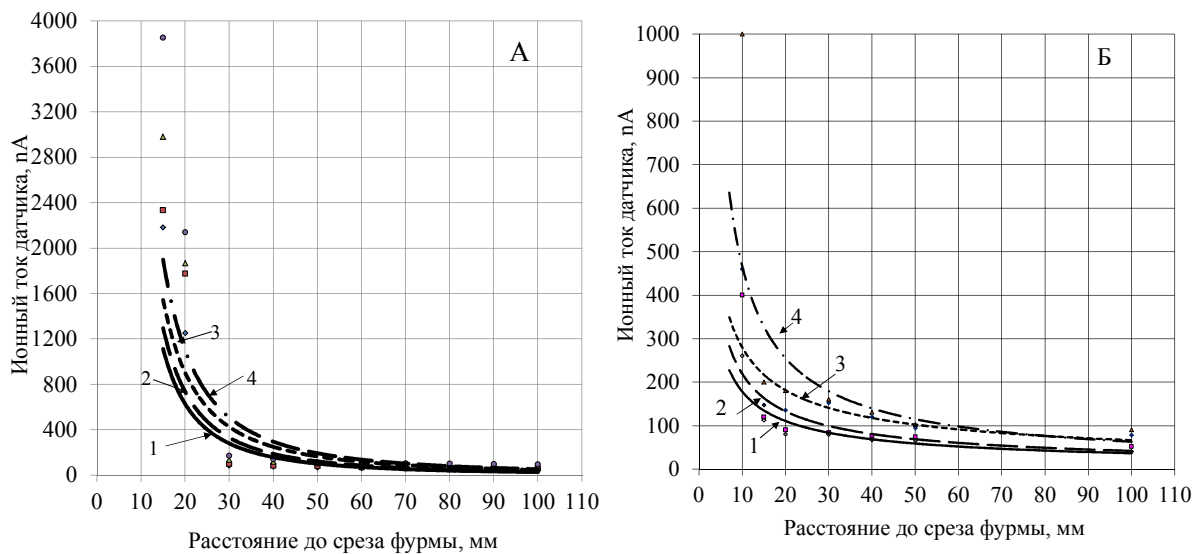


Рисунок 3 – Результаты измерения ионного тока по длине струи при расположении электрода на глубине 10 мм при продувке кислородом (А) и воздухом (Б) при различных фиксированных давлениях кислорода: 1- 0,05 МПа, 2- 0,1 МПа, 3- 0,15 МПа, 4 – 0,2 МПа

Сопоставление результатов, полученных при продувке кислородом и воздухом при одинаковом продувочном давлении газа, свидетельствуют о том, что при продувке кислородом количество ионов, формируемых при воздействии высоковольтным разрядом, было выше, чем при продувке воздухом и зависело от величины удаления от среза сопла по длине струи: на начальном участке при продувке

кислородом формировалось в 4-5 раз больше ионов, чем при продувке воздухом, а далее по длине струи их количество сближалось на расстоянии порядка 50 мм и далее по длине струи оставалось на подобном уровне. Зарегистрированная разница в величине ионного тока на начальном участке струи, вероятно, связана с количеством кислорода в продувочном газе, который, по-видимому, и превращается в ионы, а затем формирует озон и снова рекомбинирует в кислород.

### Выводы

Проведенные на разработанном и созданном на лабораторном участке ИЧМ НАНУ стенде исследования по оценке количества формируемых ионов (по величине силы ионного тока) при создании высоковольтного электрического разряда внутри и на выходе из продувочной кислородной фурмы при подаче через нее кислорода и воздуха (в качестве кислородсодержащего газа) позволили установить, что:

- в процессе активизации на срезе сопла фурмы образуется кистевой разряд, а внутри фурмы на электроде – тлеющий разряд, способствующие формированию в потоке продувочного газа заряженных частиц кислорода –ионов положительного и отрицательного знака, причем на начальном участке струи положительных ионов на 15-30 % больше;

- зависимость количества ионов от расстояния до источника их образования (электрода) не зависимо от давления продувочного газа или уровня содержания в нем кислорода имеет ярко выраженный экспоненциальный характер;

- заглубление электрода на величину 10 мм способствует максимизации значений ионного тока на близких расстояниях к срезу сопла;

- при активизации кислородного потока количество ионов на начальном участке струи в 4-5 раз больше, чем при активизации воздуха при одинаковом продувочном давлении, что, вероятно, связано с количеством кислорода в продувочном газе, который превращается в ионы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И. В. Курс общей физики: Учеб. пособие. В 3-х т./ И. В. Савельев .- т. 2. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.- 1988. - 496 с.
2. Физические основы электрического пробоя газов. Введение в теорию газового разряда / А.Ф. Дьяков, Ю.К. Бобров, А.В. Сорокин, Ю.В. Юргеленас - М.: Издательство МЭИ.- 1999.-400 с.
3. Донец Е. Д. Исследование ионизации положительных ионов электронным ударом / Е. Д. Донец, В. П. Овсянников // ЖЭТФ. - 1981.-т. 80.- С.916-920.
4. Курбанисмаилов В.С. Физика газового разряда. Учебное пособие/ В.С. Курбанисмаилов, О.А. Омаров, Н.А. Ашурбеков.- Махачкала: ИПЦ ДГУ.-2001. - 114 с.
5. Ховатсон А. М. Введение в теорию газового разряда, пер. с англ./ А. М. Ховатсон.- М.: Атомиздат.- 1980.-182с..

6. Донской А. В. Электро-плазменные процессы и установки в машиностроении / А. В. Донской, В. С. Клубинкин.- Л.: Машиностроение.- 1979.- 231 с.
7. Дембровский В. В. Плазменная металлургия / В. В. Дембровский.- М.: Металлургия.- 1981.- 239 с.
8. Кайбичев А. В. Рафинирование жидких металлов и сплавов в электрическом поле / А. В. Кайбичев, Б. М. Лепинских.- М.: Наука.- 1983.- 117 с.
9. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy: current state, problem and prospects / Yu. V. Tsvetkov // PureAppl. Chem.- 1999.-v. 71. - No. 10. - P. 1853-1862.
10. Mihovsky M. Thermal plasma application in metallurgy / M. Mihovsky // Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy. – v. 45, 1. - 2010. – P. 3-18.
11. Бурнаков К. К. Абсолютные скорости реакции окисления углерода при продувке стали кислородом и озоном / К. К. Бурнаков, А. Г. Рябухин, Л. А. Смирнов // Металлы.- 1989.- № 4.- С. 48-52.
12. Лебедев Ю.А. Электрические зонды в плазме пониженного давления/ Ю.А. Лебедев.- М.: Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН. - 2003.- 26с.

#### REFERENCES

1. Savelev I. V. Kurs obshey fiziki [Course of general physics], vol. 2, Moscow: Nauka, 1988, 496 p.
2. Djakonov A.F., Bobrov Yu.K., Sorokin A.V., Yurgelenas Yu.V. Fizicheskije osnovy elektricheskogo probuja gazov. Vvedenije v teoriju gazovogo razrjada [Physical bases of electric hasp of gases. Introduction to the theory of gas discharge], Moscow: MEI, 1999, 400 p.
3. Donets E.I., Ovsjannikov V.P. Issledovanije ionizacii polozitelnyh ionov elektronnyum udarom [Research of ionising of positive ions by an electronic blow], Journal of Experimental and Theoretical Physics, 1981, vol. 80, P.916-920.
4. Kurbanismailov V.S., Omarov O.A., Ashurbekov N.A. Fizika gazovogo razrjada [Physics of gas discharge], Makhachkala, 2001, 114 p.
5. Hovatson A. M. Vvedenie v teoriju gazovogo razrjada [Introduction in theory of gas discharge], Moscow: Atomizdat, 1980, 182p.
6. Donskoj A.V., Klubinkin V.S. Elektro-plazmennie protsessy i ustanovki v mashinostroenii [Electro-plasma processes and installations in machinebuilding], Lvov: Mashinostroenije, 1979, 231 p.
7. Dembrovskij V.V. Plazmennaja metallurgija [Plasma metallurgy], Moscow: Matallurgija, 1981, 239 p.
8. Kajbichev A.V., Lepinskih B.M. Rafinirovanie zidkih metallov i splavov v electricheskom pole [An affinage of liquid metals and alloys is in the electric field], Moscow: Nauka, 1983, 117 p.
9. Tsvetkov Yu. V. Plasma metallurgy: current state, problem and prospects, PureAppl. Chem., 1999. vol. 71, No. 10, P. 1853-1862.



10. Mihovsky M. Thermal plasma application in metallurgy, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, vol. 45, 1, 2010, P. 3-18.
11. Burnakov K.K., Rjabuhin A.G., Smirnov L.A. Absolutnije skorosti reakcii okislenija ugljeroda pri produvke stali kislorodom I ozonom [Absolute speeds of reaction of oxidization of carbon at blowing of steel by oxygen and ozone], Metally, 1989, No. 4, P. 48-52.
12. Lebedev Yu.A. Elektricheskiye zondy v plazme ponizennogo davlenija [Electric probe in low pressure plasma], Moscow, 2003, 26p.

*Received 18.02.19*

#### **STAND RESEARCH OF THE FEATURES OF ELECTROPHYSICAL ACTIVATION OF OXYGEN CONTAINING GAS FLOW**

It is known that the oxidation reactions in the oxygen converter process require the presence of mobile charged particles - ions, as components of a metal melt, and, above all, oxygen ions. Therefore, the use of electrically activated gas jets containing oxygen in converter production can become a new and relevant direction in the modernization of existing converter processes.

The basis of the proposed method is the pre-activation of the oxygen flow due to the high-voltage discharge with a capacity in two to three times lower than used in plasma metallurgy, which will lead to the formation of ozone molecules and a certain proportion of oxygen ions before its interaction with the melt.

Researches of number of formed ions (by the measuring of the ion current) during the creation of a high-voltage electrical discharge inside and at the outlet of the oxygen blowing lance when oxygen and air (as oxygen-containing gas) are supplied through it were carried out on the designed in ISI NASU stand model. It was established that in the process of activation, a brush discharge is formed at the cut-out of the lance nozzle, and a glow discharge is formed inside the lance on the electrode, contributing to the formation of charged oxygen particles -ions in the flow of blowing gas with positive and negative signs (amount of positive ions more than negative on 15-30 % on the initial part of jet).

A pronounced exponential dependence of the amount of ions on the distance to the source of their formation (electrode) is established, regardless of the pressure of the blowing gas or the level of oxygen in it.

It is revealed that the electrode depth inside the lance of 10 mm helps maximize the ion current value of gas jet on close distances to the nozzle section.

Comparison of the results, obtained during activation of oxygen and air with the same blowing pressure of gas indicates that blowing with oxygen gives higher number of ions than blowing with air and the difference depends on the distance from the nozzle section. At the initial stage in 4-5 times more ions are formed when oxygen blowing than when air blowing. And further along the length of the jet ions number become equal (at a distance of about 50 mm) and further along the length of the jet remains at a similar level. The registered difference in the level of the ion current is probably related to the amount of oxygen in the blowing gas that apparently turns into ions and then forms ozone and then recombines into oxygen again.

**Keywords:** blowing lance, oxygen and oxygen content stream, high-voltage discharge, ion current.

**СТЕНДОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОЇ  
АКТИВІЗАЦІЇ ГАЗОВОГО КИСЕНЬВМІСНОГО ПОТОКУ**

В роботі викладені результати стендових досліджень з оцінки кількості іонів (за величиною сили іонного струму), що формуються при високовольтній активізації газових струменів, що містять кисень, при їх подачі через кисневу фурму. Встановлено, що в процесі активізації на зрізі сопла фурми утворюється кистьовий розряд, а всередині фурми на електроді - тліючий розряд, що сприяють формуванню в потоці газу заряджених частинок кисню -іонів позитивного й негативного знаку, сила струму яких має яскраво виражену експонентну залежність від відстані до джерела їх утворення (електрода) не залежно від тиску газу або рівня вмісту в ньому кисню.

Виявлено, що заглиблення електроду на величину 10 мм сприяє максимізації значень іонного струму на близьких відстанях до зрізу сопла. А при активізації кисневого потоку кількість іонів на початковій ділянці струменя в 4-5 разів більше, ніж при активізації повітря при однаковому продувному тиску, що, ймовірно, пов'язано з кількістю кисню в продувному газі, який перетворюється в іони.

**Ключові слова:** продувна фурма, кисневий й кисеньвмісний потік, високовольтний розряд, іонний струм

**Семикін Сергій Іванович** – с.н.с., канд. техн. наук, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Semykin Sergey Ivanovich** – PhD, senior researcher, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine.

**Голуб Тетяна Сергіївна** – н.с., канд. техн. наук, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Golub Tatiana Sergeevna** – PhD, researcher, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine.

**Прокопенко Павло Григорович** – головний метролог, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України.

**Prokopenko Pavlo Grygorovych** – chief metrologist, Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of National academy of science of Ukraine.