

**СТЕНДОВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВИЗАЦИИ ГАЗОВОГО  
КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩЕГО ПОТОКА**

**Анотация.** 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) незалежно 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

**Annotation.** The paper presents the results of stand studies of estimation the number of formed ions (by the magnitude of the ion current strength) during high-voltage activation of gas jets containing oxygen when they are supplied through an oxygen lance. It was established that during the activation process, a brush discharge is formed at the nozzle section of the lance, and a glow discharge is formed inside the lance on the electrode, that contribute to the formation of charged oxygen particles in the flow of blowing gas -ions of positive and negative sign, the current intensity of that has a pronounced exponential dependence on the distance to the source of their formation (electrode) independently of the pressure of the blowing gas or the level of oxygen content in it.

It is revealed that the electrode depth of 10 mm helps maximize the ion current values at close distances to the nozzle section. And with the activation of the oxygen flow, the amount of ions in the initial part of the jet is 4-5 times more than with the activation of air at the same blowing pressure, which is probably due to the amount of oxygen in the gas, which is converted into ions.

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

**Постановка проблеми**

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 ожесточающихся 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 несамостоятельный 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:  $H^-$ ,  $O^-$ ,  $O^{2-}$  и другие, так и при иных условиях – положительные, например:  $O^+$ ,  $O^{2+}$  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 фирмсы стенда был оборудован электрической схемой и высоковольтным источником, а фирмса 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 (nanoамперметр), 4 – наконечник продувочной фирмсы

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 расстоянии 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	10	30	100	Положительных ионов на расстоянии, мм	10	30
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	10	30	100	Положительных ионов на расстоянии, мм	10	30
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).

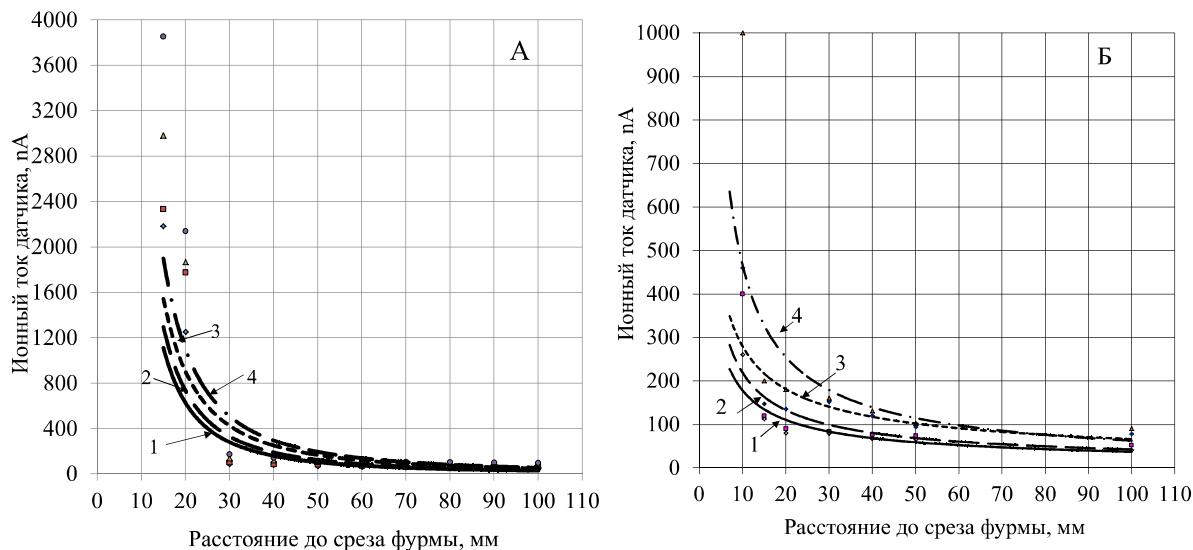


Рисунок 3 – Результаты измерения ионного тока по длине струи при расположении электрода на глубине 10 мм при продувке кислородом (А) и воздухом (Б) при различных фиксированных давлениях кислорода:  
1- 0,05 МПа, 2- 0,1 МПа, 3- 0,15 МПа, 4 – 0,2 МПа

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 максимилизации 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. Юрзеленас - 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 obshchey fiziki [Course of general phisics], vol. 2, Moscow: Nauka, 1988, 496 p.
2. Djakonov A.F., Bobrov Yu.K., Sorokin A.V., Yurgelenas Yu.V. Fizicheskie osnovy elektricheskogo probaja gazov. Vvedenie 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. Issledovaniye ionizacii polozitelnyh ionov elektronnym 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., Lepinskikh 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 ugleroda 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. Elektricheskije zondy v plazme ponizennogo davlenija [Electric probe in low pressure plasma], Moscow, 2003, 26p.