

9. Kharlashin P.S. Improving the flow theory powder mixture in gunning lance oxygen converter / P.S. Kharlashin, Assil Mohammed Kadhim, R.D. Kuzemko, V.O. Sinelnikov // XXVI International conference «Heat engineering and energy in metallurgy»: Abstracts – Dnipropetrovsk: region: NMetAU, 2014. – P. 186-187. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 24.02.2015

УДК 669.184

© Харлашин П.С.¹, Герасин С.А.²

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГАЗОВОЙ СТРУИ И ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ МЕЖФАЗНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ НА ХОЛОДНОЙ МОДЕЛИ КОНВЕРТЕРА

Теоретически разработаны и опробованы на холодной модели конвертера варианты различного погружения фурмы в жидкость, также определена скорость проникновения газовой струи в жидкость, исследовано поведение газовой струи в жидкой однородной среде. По результатам данного анализа было установлено, что за счет переменного положения фурмы обеспечивается более равномерное распределение кислорода в объеме жидкости, взаимодействие газовой струи и жидкости дает возможность расширить представление о развитии процессов массопереноса.

Ключевые слова: межфазная поверхность, газовая струя, конвертер, продувка, массоперенос.

Харлашин П.С., Герасин С.А. Дослідження взаємодії газового струменя і рідини через міжфазну поверхність на холодній моделі конвертера. Теоретично розроблені і випробувані на холодній моделі конвертера варіанти різного занурення фурми в рідину, також визначена швидкість проникнення газового струменя в рідину, досліджено поведінку газового струменя в рідкій однорідній середі. За результатами даного аналізу було встановлено, що за рахунок змінного положення фурми забезпечується більш рівномірний розподіл кисню в об'ємі рідини, взаємодія газового струменя і рідини дає можливість розширити уявлення про розвиток процесів масопереносу.

Ключові слова: міжфазна поверхність, газовий струмінь, конвертер, продування, масоперенос.

P.S. Kharlashin, S.O. Gerasin. Study of gas jet and liquid interaction through inter-phase surface on the converter simulating cold model. Various kinds of tuyere sinking into liquid have been developed and tested on a converter simulating model, velocity of gas jet penetration into liquid has been defined, the gas jet behavior in liquid homogeneous medium has been researched. Experiments have been made on a simulating model of a 250-ton oxygen converter, made in the ratio 1:25 scale. Water is a metal- simulating liquid. Technically pure oxygen is blown. A one-nozzle tuyere has been used in the experiment, a gas jet going out of it interacting with motionless liquid. The blowing conditions having been specified, the behavior of the gas jet was observed, the crater shape

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, kharlashin_p_s@pstu.edu

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ca-libr12@mail.ru

was drawn, the penetration depth was defined. Penetrating into the liquid to a maximum depth the gas jet gets reflected and moves in the opposite direction making the liquid within the boundary layer at the interface move after it. Under such circumstances, gas jet and liquid heat and mass transfer takes place at the interphase surface. The research can be used to determine the dependence of liquid cast iron interphase surface with the oxygen jet in a converter on such parameters as the tuyere height above the liquid iron surface and on the oxygen volume speed at blowing. It was stated that changing position of the tuyere ensures uniform distribution of oxygen in the liquid; the gas jet and liquid interaction makes it possible to give better idea of the mass transfer.

Keywords: *interphase surface, the gas jet, converter, blowing, mass transfer.*

Постановка проблеми. Так как исследование динамики газовой струи, втекающей в жидкость, и изменение величины межфазной поверхности через управляющие воздействия представляют для конвертерных процессов огромный практический интерес и позволяет менять скорости массообменных процессов между металлом, шлаком и газом, то вопрос изучения данных процессов приобретает актуальное значение.

Анализ последних исследований и публикаций. Процессы, в которых обобщены и систематизированы экспериментальные данные по гидродинамическим и тепломассообменным процессам, протекающим при взаимодействии газовых струй с жидкостями, представлены в монографии [1].

Среди работ по исследованию гидродинамического взаимодействия газовых струй с жидкостями, представлена работа [2], в которой предложена модель взаимодействия струи с жидкостью, описываемая довольно простыми дифференциальными уравнениями.

Интерес представляет работа [3], в которой в рамках модели Рейнольдса для турбулентных течений жидкости, получено поле скоростей в ванне кислородного конвертера. Оказывается, что при внедрении газовой струи в ограниченный объем жидкости в нем образуется торoidalный вихрь, причем вектор скорости на оси симметрии направлен вверх к свободной поверхности.

Также известна работа [4], в результате чего получена формула для площади контактной поверхности. Кроме того в работе получена формула, позволяющая находить предельно низкую высоту поднятия фурмы для достижения дозвуковой скорости струи на уровне поверхности спокойной жидкости.

Цель статьи – поставлена задача исследования взаимодействия газовой струи и жидкости через межфазную поверхность, образующуюся при проникании струи в жидкость, исследования влияния управляющих параметров на величину площади межфазной поверхности, изучение влияния положения сопла над уровнем невозмущенной жидкости, выполняемая на холодных моделях с использованием методов приближенного физического моделирования реальных процессов, протекающих в полостях конвертера. Результаты наблюдения над моделью в данном случае позволяют получить качественную картину явлений, имеющих место в реальном промышленном агрегате.

Изложение основного материала. Эксперименты проводятся на холодной модели 250-тонного кислородного конвертера, выполненной в масштабе 1:25. В качестве жидкости, моделирующей металл, используется вода. Продувка осуществляется технически чистым кислородом, поступающим из газового баллона. В экспериментах используется только односопловая фурма, перемещение и фиксация которой происходит с помощью штатива и прижимного болта, из которой истекает вертикально вниз газовая струя, взаимодействуя с неподвижной жидкостью, заполняющей некоторый объем. Схема установки показана на рисунке 1. Расход кислорода при продувке контролируется ротаметром, а давление газовым манометром.

Моделируется продувка в 250-тонном конвертере с расходом дутья, эквивалентным рабочему режиму продувки. Односопловую фурму устанавливают на уровне поверхности спокойной жидкости. Расход дутья в модели рассчитывают по формуле:

$$V_r' = v_r \sqrt{\frac{\rho_j' \rho_r}{\rho_j \rho_r'}} L^5, \quad (1)$$

где V_r' – расход дутья на модели, м³/мин;
 V_r – расход кислорода в реальном конвертере, записывается в пределах 800-900 м³/мин;
 ρ_j' – плотность удельной жидкости, кг/м³;
 ρ_j – плотность жидкого металла, кг/м³;
 ρ_r' – плотность газа, используемого на модель, кг/м³;
 ρ_r – плотность технически чистого кислорода, кг/м³;
 L – масштаб модели (1:25).

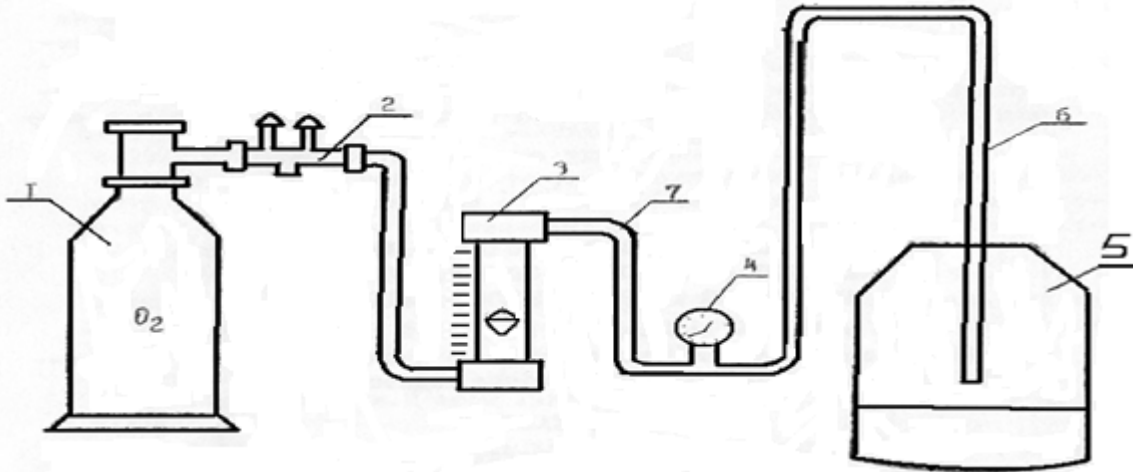


Рис. 1 – Схема установки: 1 – баллон с технический кислородом; 2 – газовый редуктор; 3 – ротаметр; 4 – атомметр; 5 – прозрачная модель конвертера; 6 – односопловая фурма; 7 – гибкие шланги

После определения и установки заданного режима продувки происходит наблюдение за поведением газовой струи, в жидкость эскизируется форма кратера и фиксируется глубина погружения газовой струи в жидкость [5]. Струя газа, внедрившись в жидкость и достигнув максимальной глубины проникания, отражается и, изменяя направление движения на противоположное, увлекает за собой жидкость в пределах пограничного слоя, образующегося у поверхности раздела сред. При таких условиях тепломассообмен струи с жидкостью происходит на межфазной поверхности.

Форма образующегося кратера идеализируются в виде шарового сегмента или усеченного конуса в сочетании с шаровым сегментом (рисунок 2).

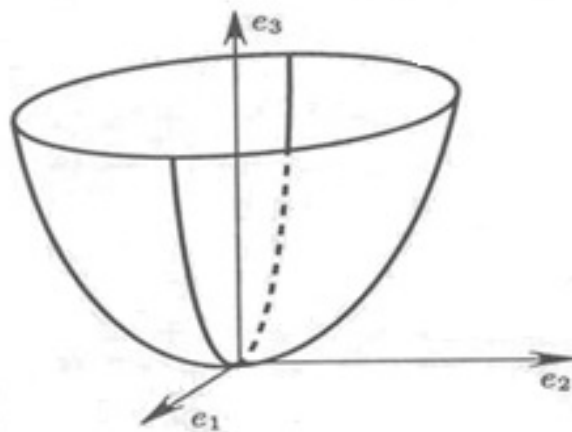


Рис. 2 – Схема контактной поверхности

Степень смешения истекающей струи в пространство, заполненное средой с той же плотностью, что и истекающая среда, например, вода в воду, определяется уравнением:

$$\varepsilon = \frac{c_x - c_{cp}}{c_a - c_{cp}} = \frac{t_x - t_{cp}}{t_a - t_{cp}} = \frac{W_x}{W_a} = \varphi_1(x/d), \quad (2)$$

где d – гидравлический диаметр сопла в м;
 x – расстояние от оси до устья сопла в м;
 W_a – скорость оси по оси истечения у выхода из устья сопла в м/сек;
 W_x – скорость струи по оси истечения на расстоянии x метров от устья сопла в м/сек;
 ε – состав струи; если жидкости не смешиваются между собой, как например газ и металл, то тогда ε выражает только отношение осевой скорости струи в точке потока W_x к той же осевой скорости потока при выходе из устья сопла W_a [6].

Числовое значение ε , справедливо для любого турбулентного потока, независимо от величины числа Рейнольдса. Перенос из слоя в слой количества движения, выражается одной и той же функцией с теми же постоянными коэффициентами. Это важное кинематическое свойство струи допускает широкий выбор методики для изучения смешения струй с окружающей средой [7-8].

Решение задачи о движении жидкости при воздействии на нее струи газа целесообразно проводить в цилиндрической системе координат. Уравнения, описывающие установившееся изотермическое движение вязкой жидкости в этой системе, имеют вид:

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2} \right), \quad (3)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \quad (4)$$

$$\frac{\partial(ru)}{\partial r} + \frac{\partial(rv)}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

Уравнения (3)-(5) представляют замкнутую нелинейную систему трех уравнений в частных производных второго порядка с тремя неизвестными функциями u, v, ρ . Для получения необходимых конкретных решений при интегрировании приведенной системы уравнений должны быть использованы соответствующие граничные условия.

Определяются скорость и плотность газа на срезе сопла, также параметры газовой струи на уровне свободной поверхности неподвижной жидкости. Исследуются геометрические характеристики межфазной поверхности.

Скорость проникания газовой струи в жидкость определяем по формуле:

$$V = \sqrt{\frac{2p_1}{\rho_2} \left(\left(1 + \frac{k-1}{k} \frac{\rho_m u_m^2}{2p_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1 \right)}, \quad (6)$$

где k – показатель адиабаты;
 ρ_2 – плотность жидкости.

Глубина проникания струи в жидкость h определяются по формуле:

$$h = n \frac{V^2}{2g}. \quad (7)$$

Уравнение контактной поверхности можно представить в следующем виде:

$$r = 2ath \frac{x}{2a}. \quad (8)$$

Важными характеристиками являются диаметр D впадины, внутренняя поверхность которой является контактной поверхностью, и площадь S межфазной поверхности, величина которой играет значительную роль при тепломассообмене газа с жидкостью.

Указанные характеристики определяются по формулам:

$$D = \sqrt[4]{1 - \left(\frac{a}{R_0}\right)^2}, \quad (9)$$

$$S = 8\pi a^2 \ln \frac{R_0}{a}, \quad (10)$$

где

$$R_0 = \frac{1}{2} \left(h - a + \sqrt{(h - a)^2 + 8a^2} \right). \quad (11)$$

При исследовании теплообменных процессов в кислородных конвертерах важное значение имеет площадь межфазной поверхности, где протекают первичные химические реакции [8]. В этой связи возникает проблема определения оптимальной высоты поднятия фурмы над уровнем жидкости H_* , которая обеспечивает наибольшую площадь контактной поверхности газа с жидкостью. Ограничительным условием при этом является то, что высота поднятия фурмы не должна быть ниже значения H_* , при которой скорость газа равна местной скорости звука.

Величина H_* определяется по следующей формуле:

$$\frac{H_*}{d_0} = \frac{6,25}{\sqrt{\ln \frac{M_0^2}{M_0^2 - 2}}}. \quad (12)$$

Размеры кратера и глубина лунки (рисунок 3), определяются с помощью мерной линейки. Далее, не изменяя рассчитанного расхода дутья, фурму поднимают над поверхностью ванны периодически на 20, 40, 60, 80, 100 мм. Производят аналогичные измерения. Результаты заносят в таблицу.

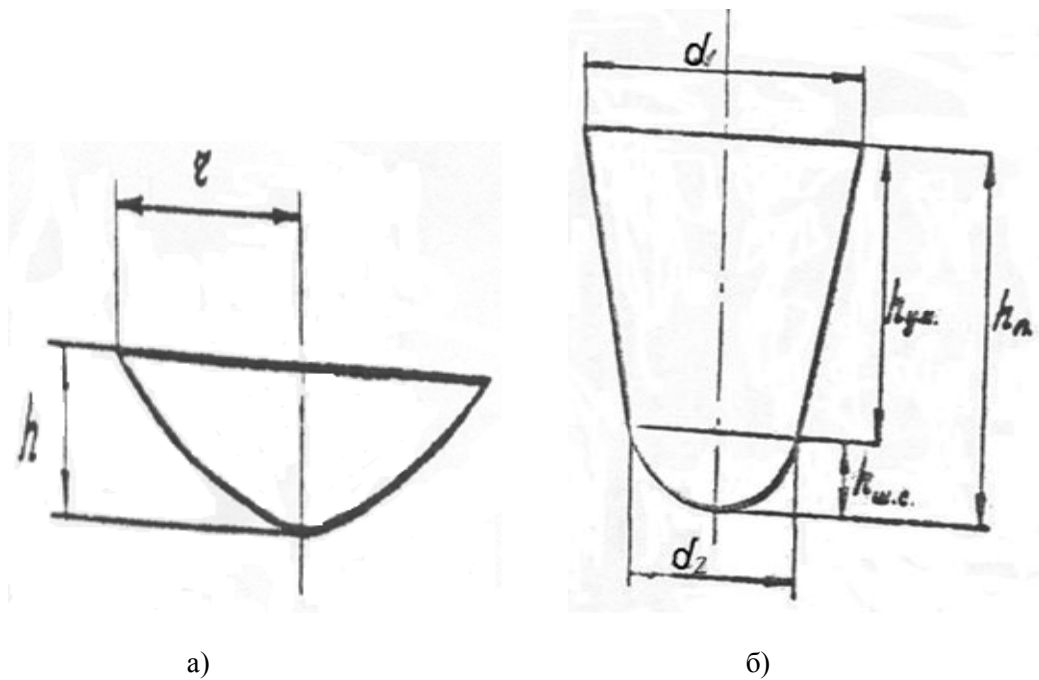


Рис. 3 – Форма кратера: а – шаровой сегмент; б – сочетание шарового сегмента с усеченным конусом

Таблица

Параметры реакционной зоны конвертера

№ пп	Расход дутья, м ³ /мин	Положение сопла над ванной, мм	Форма реакционной зоны	Основные размеры реакционной зоны, мм					
				h	d_1	d_2	$h_{y.k}$	$h_{ш.с.}$	h_a
1	0,6	0	У.к. + ш.с.	55	220	110	77	33	110
2	0,8	20	У.к. + ш.с.	44	118	88	55.5	22	88
3	1	40	П.с.+ш.с.	22	116	66	33.5	11	66
4	1,2	60	П.с.+л.	00.5	114	44.5	11.5	00.5	33.5

Предлагаемые исследования можно использовать для определения межфазной поверхности жидкого чугуна со струей кислорода в конвертере, от таких параметров как высота фурмы над уровнем поверхности жидкого чугуна и от объемной скорости истечения кислорода при продувке [6]. Целенаправленное изменение динамики газовой струи, втекающей в жидкость, и изменение величины межфазной поверхности через управляющие воздействия, позволяет менять скорости массообменных процессов между металлом, шлаком и газом по заданной рациональной программе.

Выводы

1. Наши исследования показали, что в многомерном объекте, каким является кислородно-конвертерная плавка, изменение протекания технологического процесса, можно производить путем изменения параметров дутьевого режима – расхода кислородного дутья и положения фурмы, непосредственно влияя на экономические показатели процесса. Полученные результаты могут быть использованы при создании общей физико-математической модели кислородно-конвертерного процесса.

2. Разработана физическая модель 250 т кислородного конвертера, позволяющая выполнить исследования гидродинамического состояния, исследования взаимодействия газовой струи и жидкости через межфазную поверхность, что дает возможность расширить представления о развитии процессов массопереноса с учетом конфигурации конвертера и расположения продувочного устройства, рассчитаны геометрические характеристики межфазной поверхности на основе теории проникания.

3. Размеры кратера и глубина лунки определяются по форме основания воронки, расходу дутья и положению фурмы над жидкостью.

4. В процессе продувки определяют скорость проникания газовой струи в жидкость, степень смешения истекающей струи в пространство заполненное средой с той же плотностью, что и истекающая среда.

Список использованных источников:

1. Баптизманский В.И. Теория кислородно-конвертерного процесса / В.И. Баптизманский. – М. : Металлургия, 1975. – 376 с.
2. Алдошин Г.Т. Исследование гидродинамического и теплового взаимодействия газовых струй с жидкостями и дисперсными средами / Г.Т. Алдошин // Тепло- и массоперенос. – Т. 1. – 1972. – С. 287-296.
3. Коваль В.П. Математическое моделирование движения жидкости в осесимметричной ванне под действием вдуваемой струи / В.П. Коваль, А.В. Потапов // Инженерно-физический журнал. – 1977. – Т. 32. – С. 443-448.
4. Горбунов К.С. Аналитическое решение задачи о динамическом взаимодействии газовой струи с несжимаемой жидкостью / К.С. Горбунов // Математические и экономические модели в оперативном управлении производством. – М. : Электрика. – 1998. – №8. – С. 32-33.
5. Казанцев И.Г. Исследование динамики газообразной струи втекающей в жидкость / И.Г. Казанцев // Термическая и пластическая обработка металлов: Сб. науч. тр. / ЖДМИ. – Харьков, 1952. – Вып. 2. – С. 56-59.
6. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В.И. Явойский, Г.А. Дрофеев,

- И.Л. Повх. – М. : Metallurgiya, 1974. – 495 с.
7. Казанцев И.Г. Механика газовой струи в бессемеровской ванне / И.Г. Казанцев // Сталь. – 1940. – №1. – С. 16-18.
 8. Марков Б.Л. О внедрении газовой струи в жидкость / Б.Л. Марков, А.А. Кирсанов // Черная металлургия. – 1970. – №8. – С. 42-47.

Bibliography:

1. Baptizmansky V.I. Theory oxygen converter process / V.I. Baptizmansky. – М. : Metallurgiya, 1975. – 376 p. (Rus.)
2. Aldoshin G.T. The study of hydrodynamic and thermal interaction of gas jets with liquids and disperse media / G.T. Aldoshin // Heat and the mass transfer. – Vol. 1. – 1972. – P. 287-296. (Rus.)
3. Koval V.P. Mathematical modeling of fluid motion in axisymmetric bath under the action the injected jet / V.P. Koval, A.V. Potapov // Journal of Engineering Physics. – 1977. – V. 32. – P. 443-448. (Rus.)
4. Gorbunov K.S. Analytical solution of the dynamical interaction of the gas jet with an incompressible fluid / K.S. Gorbunov // Mathematical and economic models in operations management. – М. : Electrical. – 1998. – №8. – P. 32-33. (Rus.)
5. Kazantsev I.G. Investigation of the dynamics of the gaseous jets tering into liquid // Heat and plastic treatment of metals: Collection of scientific works / ZHDMI. – Kharkiv, 1952. – Issue 2. – P. 56-59. (Rus.)
6. Yavoysky V.I. Theory of a purge of a steel-smelting bathtub / V.I. Yavoysky, G.A. Drofeev, I.L. Povkh. – М. : Metallurgiya, 1974. – 495 p. (Rus.)
7. Kazantsev I.G. The mechanics of the gas jet in Bessemer bath // Steel. – 1940. – №1. – P. 16-18. (Rus.)
8. Markov B.L. On the implementation of the gas jet in liquid / B.L. Markov, A.A. Kirsanov // Ferrous metallurgy. – 1970. – №8. – P. 42-47. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 18.02.2015

УДК 669.146

© Чичкарев Е.А.¹, Цюцюра А.В.², Алексеева В.А.³, Чичкарев К.Е.⁴

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ РАСКИСЛЕНИЯ И
ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКИ НИЗКОКРЕМНИСТЫХ МАРОК СТАЛИ**

Проанализированы условия раскисления и внепечной обработки низкокремнистой стали. Установлен рост размаха варьирования активности кислорода в конвертере перед выпуском по мере уменьшения массовой доли углерода в металле. Проанализировано влияние науглероживания плавки на расход и степень усвоения алюминия. Показано, что при выплавке низкокремнистых марок стали с внепечной обработкой без использования установки ковши-печь рациональные пределы варьирования массовой доли оксида магния в ковшевом шлаке – 6-8% масс.

Ключевые слова: низкокремнистая сталь; неметаллические включения; внепечная обработка; установка ковши-печь.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, influence@meta.ua

² начальник конвертерной лаборатории, ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь, cos_donbass@mail.ru

³ ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, ave-ni@list.ru

⁴ инженер, ПАО «ММК им. Ильича», г. Мариуполь, cos_donbass@mail.ru