

УДК 669.184.244.66:669.184.252.4

**С.И.Семыкин, Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко,****ПОВЕДЕНИЕ КИСЛОРОДА И АЗОТА В РАСПЛАВЕ В ПРОЦЕССЕ  
КИСЛОРОДНО-КОНВЕРТЕРНОЙ ПЛАВКИ***Институт черной металлургии им. З.И.Некрасова НАН Украины*

В работе выполнено сравнение эффективности различных технологий и вариантов кислородно-конвертерной плавки по возможности достижения минимального содержания кислорода и азота в стали. Выявлено влияние вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней и комбинированной продувкой на содержание газов в расплаве, что позволяет ранжировать технологии и определять области их возможного применения. Показано, что технология верхней продувки кислородом по наложению электрических потенциалов позволяет уменьшить содержание кислорода в расплаве на 40-70%, а азота - на 25-40%.

**Ключевые слова:** конвертер, варианты технологии, содержание кислорода и азота в расплаве, анализ, сопоставление.

**Постановка задачи.** Для условий металлургических предприятий Украины решение проблемы снижения насыщенности стали газами, которое позволит решать энергетические и технико-экономические задачи, требует совершенствования общего технического уровня кислородно-конвертерного производства. В этой связи для изучения влияния технологических особенностей плавки на содержание кислорода и азота в железоуглеродистых расплавах, проведено исследование наиболее известных в мировой практике вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней и комбинированной продувкой, в том числе с наложением электрических потенциалов на расплав.

Основной объем экспериментальных данных относится к исследованиям на лабораторном оборудовании экспериментальной базы ИЧМ с использованием: 1,5-т кислородного конвертера, 300-кг конвертера, и на установках, моделирующих конвертерный процесс. Основные положения лабораторных исследований проходили проверку на 160-т и 250-т промышленных конвертерах.

**Методика исследования.** Известные и изученные технологии выплавки металла в конвертере были сгруппированы и классифицированы по пяти базовым вариантам (А, Б, В, Г, Д). Признаками, отличающими исследуемые процессы друг от друга, являются способы организации подачи дутья и методы повышения тепловых возможностей кислородно-конвертерной плавки. Исходя из таких условий, изученные технологии были распределены и классифицированы по 5 базовым вариантам: А – верхняя продувка (O<sub>2</sub> сверху); Б – комбинированная продувка (O<sub>2</sub> сверху, N<sub>2</sub> снизу); В – комбинированная продувка (O<sub>2</sub> сверху, O<sub>2</sub> снизу); Г – комбинированная продувка (O<sub>2</sub> сверху, газ - топливо снизу) и 100% лома (без жидкого чугуна); Д – донная продувка (O<sub>2</sub> снизу).

Для возможности проведения сопоставительного анализа при классификации дополнительно использована возможность присвоения рассматриваемым технологиям номера и шифра, который позволял в краткой форме (в свернутом формате) характеризовать параметры технологии. В работе приняты следующие обозначения изученных вариантов (таблица):

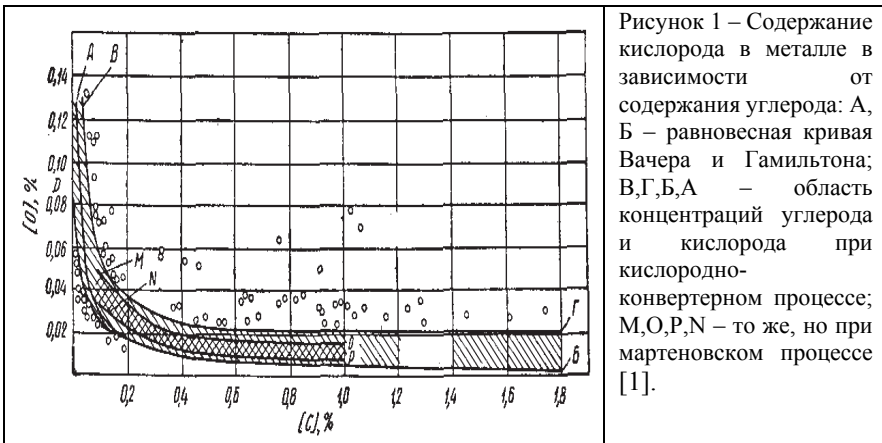
Таблица – Используемые в работе условные обозначения и шифры технологий

1а (А2) Продувка кислородом сверху через односопловую фурму с диаметром сопла 8,3 мм). Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓(Ф1*8,3мм).
2а (А2+Л) Продувка кислородом сверху через односопловую фурму (Ф*8,3мм) с ломом. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓(Ф1*8,3мм)+Л.
3а (А2+Л+К) Продувка кислородом сверху с ломом и с добавкой кокса. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓(Ф1*8,3мм) + К.
4а (А2а01) Продувка кислородом сверху через 2-х ярусную фурму (2-й ярус Н=200 мм) для дожигания окиси углерода. Шифр технологии: [O <sub>2</sub> ↓(Ф1*8,3)+O <sub>2</sub> ↓(Ф3*4,5мм) Н200]+Л.
5а (А3) Продувка кислородом сверху с использованием фурмы для вдувания угольных порошков сверху. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓N <sub>2</sub> ↓(Ф*14*20мм).
6а (А4т) Продувка кислородом сверху с ломом и вдуванием пыли УСТК через верхнюю фурму. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓N <sub>2</sub> ↓(Ф1*14*20мм)+Л+УСТК↓.
7а (А5т) Продувка кислородом сверху с вдуванием полукокса через верхнюю фурму. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓N <sub>2</sub> ↓(Ф1*14*20мм)+Л+ПК↓.
8а (А6т) Продувка кислородом сверху с ломом и с вдуванием термоугля через верхнюю фурму O <sub>2</sub> ↓N <sub>2</sub> ↓(Ф1*14*20мм)+Л+ТУ↓
9а (А7т) Продувка кислородом сверху с ломом и с вдуванием угольного порошка из углей марки Т (тощий) через верхнюю фурму. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓(Ф*14*20мм)+Л+УпТ↓N ↓.
10а (А7+Л+УТлома) Продувка кислородом сверху с ломом и с вдуванием пУ из углей марки Т (тощий) через верхнюю фурму с предварительным подогревом лома. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓(Ф*14*20мм)+Л+УпТ↓N ↓+Тлома.
11а (А7+Л+УСС) Продувка кислородом сверху с ломом и с вдуванием пУ из углей марки «СС» через верхнюю фурму с предварительным подогревом лома. Шифр технологии: O <sub>2</sub> ↓N <sub>2</sub> ↓(Ф*14мм*20мм)+Л+УП"СС"↓.

Принятые условные обозначения: ↓ – продувка сверху; ↑ – продувка снизу; (+) - наложение положительного потенциала на верхнюю фурму;  
 (-) - наложение отрицательного потенциала на верхнюю фурму; O<sub>2</sub> – кислород; N<sub>2</sub> – азот; В – воздух; ПГ – природный газ; КГ – конвертерный газ; Л – металлолом; Ф1\*8,3мм – верхняя фурма (одна фурма с диаметром сопла 8,3 мм); К – кокс;

ПК – полукокс; ТУ – термоуголь; Уп – пылевидный уголь; УпГ – пылевидный тощий уголь; Тлома – предварительный подогрев металлолома; УСТК, ИОТК, СС – марка угля; Н200 – второй ярус верхней фурмы на высоте 200мм; ПВ – нижняя фурма в виде пробковой вставки; Д3\*3мм – нижняя фурма (3 фурмы диаметром 3 мм); У – уголь; кУ – кусковый уголь;

Реальное содержание кислорода в металле различных сталеплавильных процессов существенно различается, и в качестве примера, представлено на рис. 1 [1]. Из рисунка следует, что концентрация кислорода существенно зависит от содержания углерода в металле.



**Методика проведения сравнительных исследований.** Оценку эффективности технологии по содержанию кислорода и азота осуществляли по следующим двум методикам. В первом случае сопоставляли показатели отношения фактического содержания кислорода в расплаве  $[O]ф$  (факт) к равновесному  $[O]р$  при одинаковых значениях углерода. Величину  $[O]р$  находили по известной формуле Вачера - Гамильтона:

$$[O]р * [C]р = 0,0025 \quad (1)$$

Во втором случае строили зависимости  $[O]ф$  от  $[C]ф$ , причем на графике дополнительно наносили известную зависимость Вачера-Гамильтона, что позволяет определить не только наличие влияния параметров технологии во всем диапазоне концентрации углерода, но и сопоставить величину  $[O]ф$  с кривой Вачера - Гамильтона.

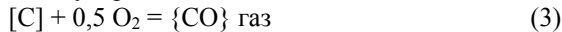
В. И. Явойский на основании обобщения многочисленных лабораторных и промышленных исследований равновесного состояния кислорода представил произведение  $[O]*[C]$  в виде выражения:  $[O]*[C] = a + b[C]$ , а зависимость равновесного количества растворенного кислорода в расплаве – в виде выражения [2]:

$$[O]р = 0,0029/[C]ф + 0,0031 \quad (2)$$

Проведенный анализ показал (рис.3), что для проведения качественных исследований не имеет принципиального значения какому из этих выражений отдать предпочтение, поскольку характер изменения линий на диаграммах качественно схожий.

	Рисунок 2 – Сравнение равновесного количества растворенного в расплаве кислорода по формулам Вачера-Гамильтона и В.И. Явойского.
--	--

Анализ кинетических кривых окисления примеси из расплава показывает, что после окисления марганца и кремния основное количество вдуваемого в ванну кислорода расходуется на окисление углерода, поэтому в этот период продувки ведущей реакцией является окисление углерода, растворенного в металле, представленной без учета целого ряда промежуточных реакций в молекулярном виде:



Эта реакция остается ведущей до достижения остаточного содержания углерода порядка 0,1-0,2 %. Вместе с тем, при концентрации углерода менее 0,2-0,3% быстро увеличивается доля кислорода, который расходуется на окисление железа. Константа равновесия реакции в общем виде определяется выражением:

$$K_{CO} = P_{CO}/(a[C]^* b[O]) \quad (4)$$

При концентрациях углерода до 1%, а кислорода до 0,08% коэффициенты их активности примерно равны единице, поэтому

$$K_{CO} = P_{CO}/([C]^*[O]) \quad (5).$$

Поскольку значение теплового эффекта реакции мало, им можно пренебречь. Тогда для любой температуры

$$K_{CO} = P_{CO}/([C] [O]) = \text{const} \quad (6)$$

В конце сталеплавильного процесса при температуре выше 1600°C для открытых агрегатов ( $P_{CO} = 1 \text{ кг/см}^2$ ), можно считать, что  $K_{CO} = 402$ , тогда

$$[C]^*[O] = P_{CO}/K_{CO} = P_{CO}/402 = 0,0025 P_{CO} = 0,0025 \quad (7)$$

Это выражение известно как константа равновесия Вачера-Гамильтона.

Произведение  $[O]^*[C]$  вошло в практику сталеплавильного производства при анализе отклонения от равновесия. Однако, несмотря на достаточно широкое применение для теоретического анализа, оно пока не имеет сформулированного объяснения. Практически для всех сталеплавильных процессов зависимость произведения  $[O]^*[C]$  представляет собой

прямую линию, которую удобно использовать для оценки эффективности той или иной технологии сталеплавильного производства.

При проведении анализа установлено, что подобные зависимости для различных технологий кислородно-конвертерной плавки в интервале содержаний углерода 0,01–1,5% имеют прямолинейный характер. Объяснить наличие прямолинейной зависимости произведения  $[O]*[C]$  от содержания углерода в расплаве можно на примере аналогичной зависимости объема тела от его поверхности и линейных размеров. В этом случае, учитывая ярко выраженные поверхностные активные свойства кислорода, параметр  $[O]$  отражает поверхностные характеристики, а объемное распределение углерода отражает линейные свойства группировок. Тогда их произведение  $[O]*[C]$  представляет собой объемные группировки молекул железа в жидкости (кластерная структура расплава), а содержание  $[C]$  подобно линейному параметру этих группировок (граница раздела фаз), по которой происходит контакт железа с кислородом (другими окислами, азотом и НВ) и последующее окисление углерода частицами образовавшегося окисла железа  $FeO$ .

Для всех рассмотренных вариантов технологии были построены зависимости  $[O]*[C]$  от  $[C]$ , образцы которых представлены на рис.3.

Использование такого подхода позволяет провести ранжирование различных вариантов технологии с точки зрения эффективности получения минимального содержания кислорода в расплаве. Для ранжирования вариантов технологий учитывали зависимость концентрации кислорода и азота от содержания углерода в расплаве и сопоставляли ее с показателем  $[O]_{\text{ф}}/[O]_{\text{р}}$  при одинаковых значениях углерода, принимая величину равновесного содержания кислорода по формуле (1) Вачера-Гамильтона. Помимо этого, строили графические зависимости содержания азота и кислорода, а также показатель  $[O]_{\text{ф}}/[O]_{\text{р}}$  от концентрации углерода во всем диапазоне его зафиксированных экспериментальных значений. Это позволяет не только более четко и наглядно выявить изучаемые зависимости, но и определить влияние внешних воздействий, в т.ч. электрических, при различных содержаниях углерода, в т.ч. низких и ультранизких. Ультранизкие содержания углерода представляют особый интерес в связи с тем, что масштабы производства и применения сталей такого сортамента расширяются высокими темпами.

Таким образом, основным критерием оценки эффективности рассматриваемой технологии по содержанию кислорода и азота в расплаве примем коэффициент равновесности по кислороду ( $K^O_{\text{р}}$ ), равный отношению фактического содержания кислорода  $[O]_{\text{ф}}$  к равновесному содержанию кислорода  $[O]_{\text{р}}$  при одинаковом содержании углерода в расплаве  $[C]$ :

$$K^O_{\text{р}} = [O]_{\text{ф}}/[O]_{\text{р}} \text{ (при одинаковом } [C]) \quad (8)$$

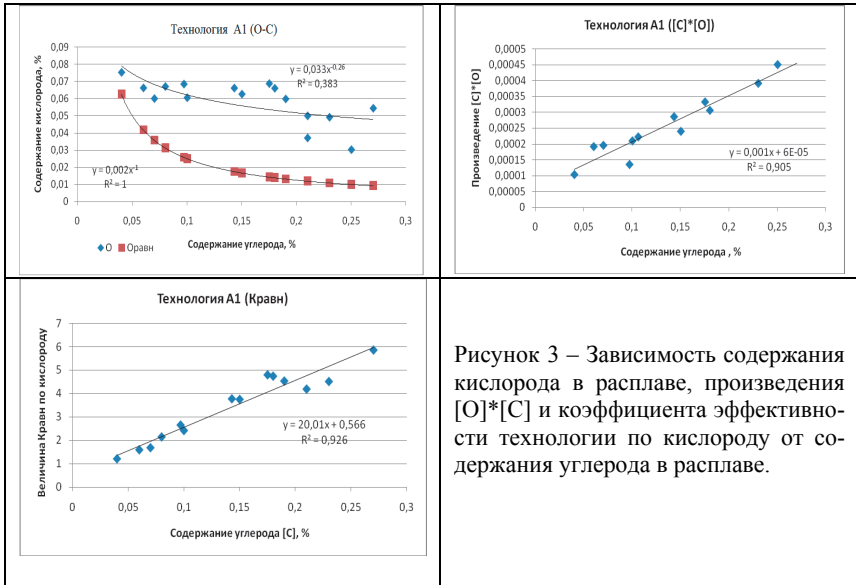


Рисунок 3 – Зависимость содержания кислорода в расплаве, произведения [O]\*[C] и коэффициента эффективности технологии по кислороду от содержания углерода в расплаве.

Для коэффициента эффективности рассматриваемой и базовой технологии по кислороду ( $K^O_T$ ) примем отношение фактического содержания кислорода в расплаве  $[O]_Ф$  к содержанию кислорода  $[O]_Б$  при технологии, принятой в качестве базовой для сравнения.

$$K^O_T = [O]_Ф/[O]_Б \text{ (при одинаковом [C])} \quad (9)$$

### Изложение основных материалов исследования.

На рис.4 представлен массив данных по содержанию кислорода в расплаве, полученных при проведении исследований на 1,5-т конвертере. Оценка общего массива данных показывает, что по сравнению с верхней продувкой (А) технология с комбинированной продувкой (Б) позволяет получить меньшее содержание кислорода в расплаве только при снижении содержания углерода ниже 0,6%. Технология (В) позволяет иметь более низкие содержания кислорода в расплаве в большем диапазоне значений содержания углерода.

Оценка общего массива данных по содержанию азота в расплаве показывает, что по сравнению с верхней продувкой (А) технология с комбинированной продувкой (Б) с продувкой ванны конвертера азотом снизу дает большее содержание азота в расплаве при снижении содержания углерода ниже 0,5%. Технология В по сравнению с верхней продувкой обеспечивает более низкие содержания азота в расплаве (на 25-30%) при любых содержаниях в нем углерода (рис.5).

Приведенные на рис.4-5 данные имеют общий характер и не учитывают влияние конкретных вариантов кислородно-конвертерной

плавки. Исследования по конкретным вариантам кислородно-конвертерной плавки показывают, что содержание азота и кислорода в расплаве в значительной степени зависит от варианта перемешивания сталеплавильной ванны и качества используемого топлива, которое применяется для повышения доли лома в завалке и при технологии получения металла без применения жидкого чугуна.

Для выявления особенностей различных вариантов кислородно-конвертерной плавки в качестве базового выбран наиболее широко используемый в Украине вариант технологии 1а (А2) с верхней продувкой в глухдонном конвертере (таблица и рис.6-13).

Приведенные данные позволяют сделать следующие выводы.

Содержание кислорода и азота зависит от способа организации перемешивания расплава и тесно связано с содержанием углерода в расплаве, что подтверждает существенное влияние структурного состава расплава на содержание в нем газов [3].

По мере снижения концентрации углерода в расплаве менее 0,2% содержание кислорода в металле существенно повышается. Азот при этом содержании углерода все более отдаленно от равновесного состояния, однако механизм его поведения при этом отличается от механизма поведения кислорода, поскольку азот входит в состав расплава в виде химического соединения – нитрида. Трудности удаления кислорода из расплава при низком и сверхнизком содержании углерода связаны с снижением раскисляющих свойств растворенного в металле углерода при его низких концентрациях. Трудности удаления азота связаны с образованием между азотом и железом весьма прочных химических связей, что препятствует его механическому удалению за счет перемешивания (барботирования) расплава.

Независимо от содержания кислорода и азота в исходной шихте в процессе кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой на заключительной стадии продувки происходит повышение концентрации кислорода в расплаве до величины 0,05-0,12% и зота до 0,002 % (см.рис.4 и рис.5). При повышении температуры расплава происходит уменьшение размеров твердых группировок (кластеров) элементов химического состава, в результате чего увеличивается общая поверхность кластеров, на которую налипают частицы газа CO и нитридов FeN, что приводит к увеличению содержания газов в расплаве.

Барботажа ванны расплава в процессе кислородно-конвертерной плавки является основным условием для объединения образующихся на атомном уровне химических соединений (CO и FeN) в более крупные образования, способные удалиться из расплава под действием газовых пузырей и физических выталкивающих сил.

Рисунок 4 – Общее содержание кислорода в расплаве при различных технологиях кислородно-конвертерной плавки и их сравнительная эффективность

Рисунок 5 – Общее содержание азота в расплаве при различных технологиях кислородно-конвертерной плавки и их сравнительная эффективность



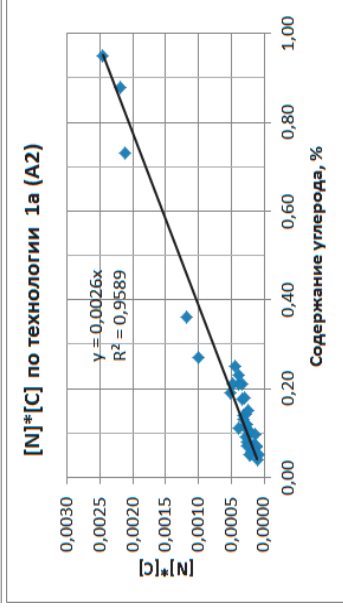
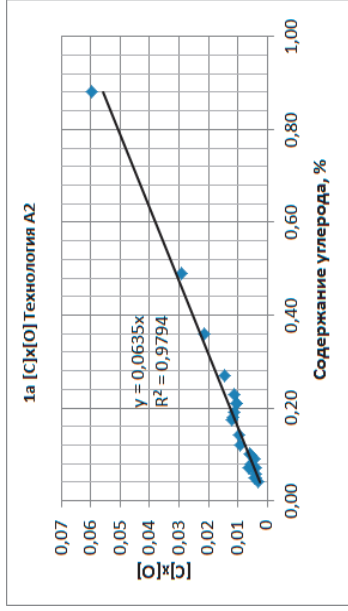
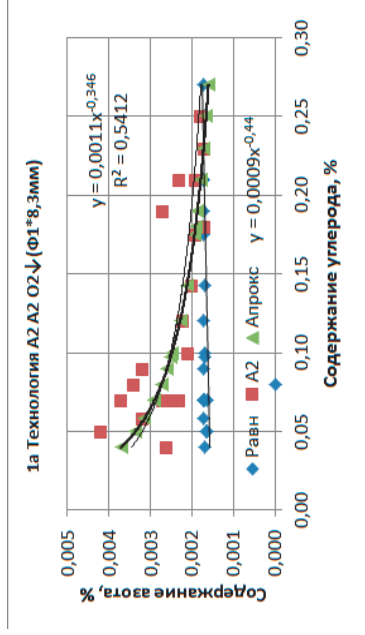
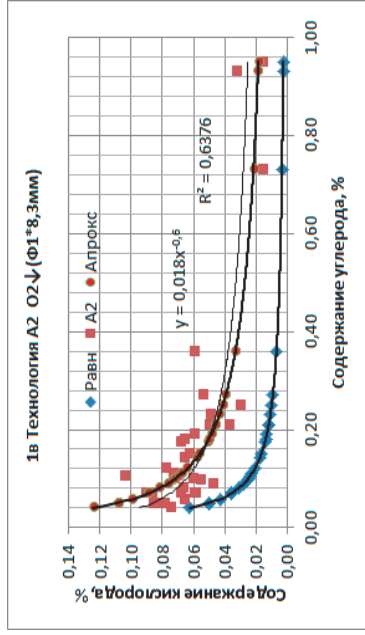


Рисунок 6 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология 1а O2 ↓ (Ф1\*8,3мм)

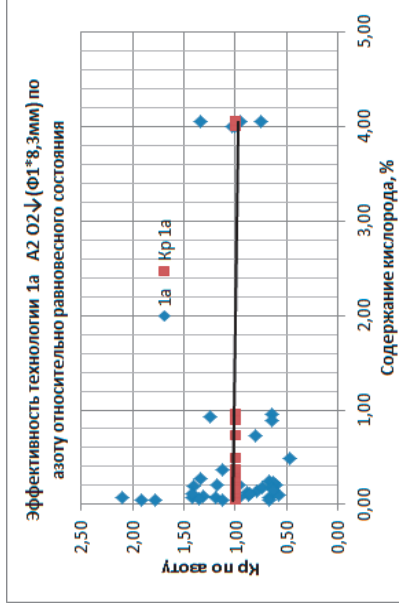
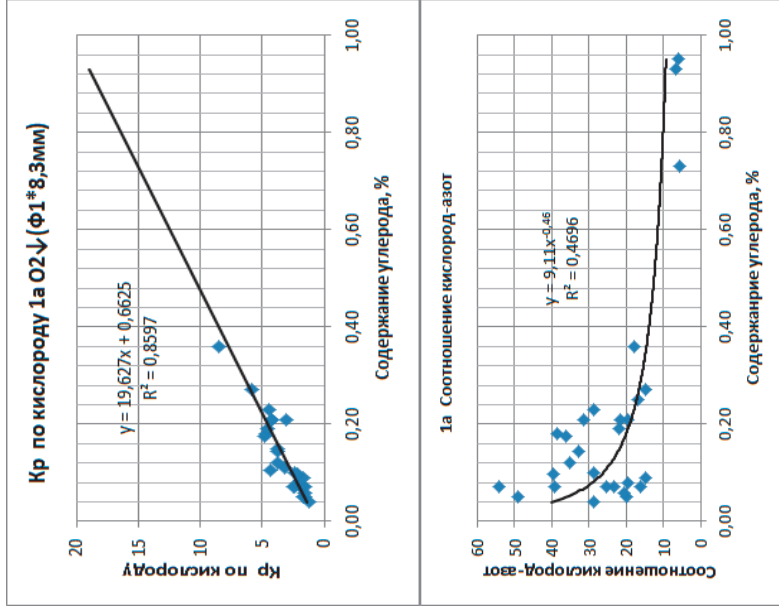


Рисунок 7 – Экспериментальные данные по коэффициенту равновесности по технологии, эффективность технологии относительно равновесного состояния и соотношение кислород-азот по ходу продувки. Технология 1a O2↓(Ф1\*8,3мм)

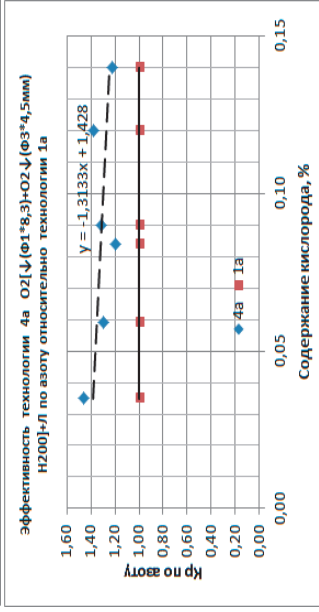
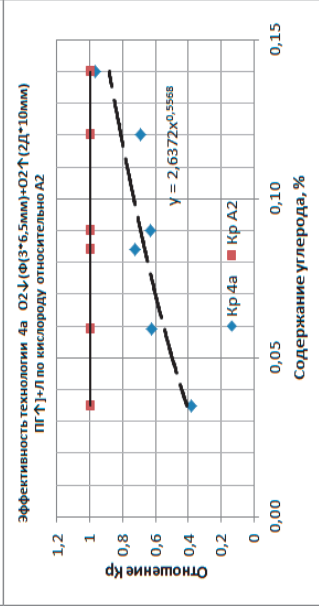
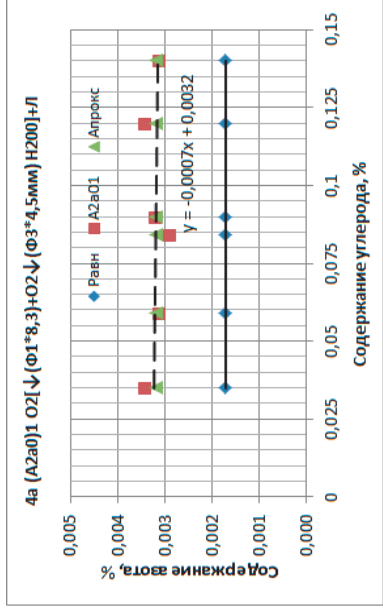
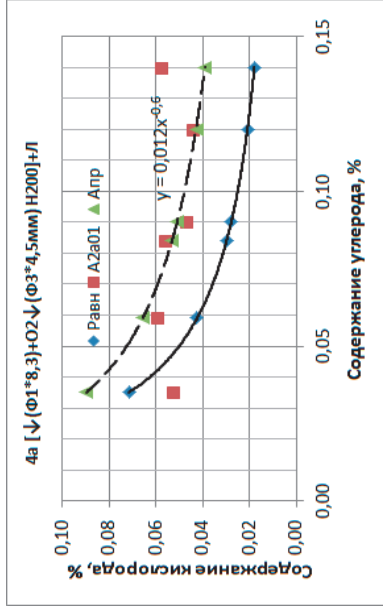


Рисунок 8 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология O2↓(Ф1\*8,3)+O2↓(Ф3\*4,5мм) H200]±Л

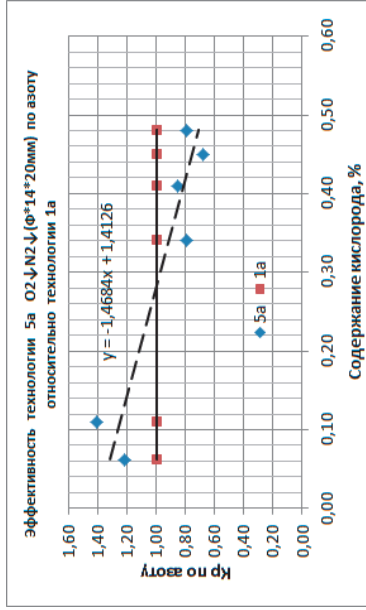
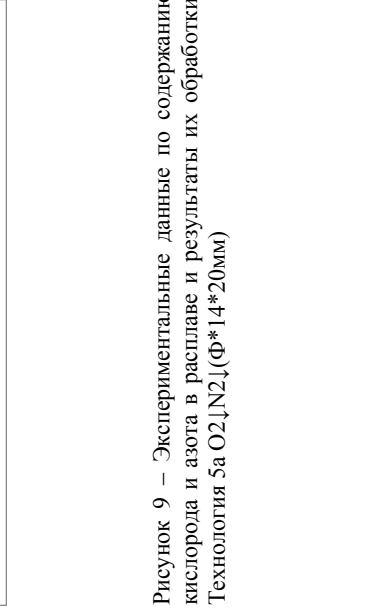
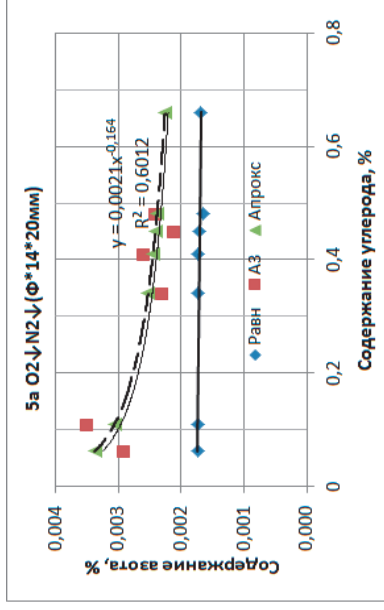
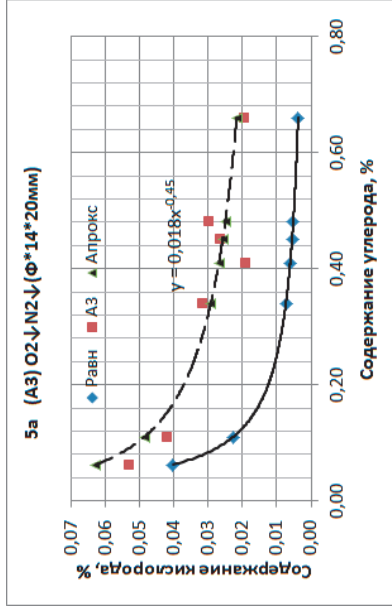


Рисунок 9 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология 5a O<sub>2</sub>↓N<sub>2</sub>↓(Ф\*14\*20мм)

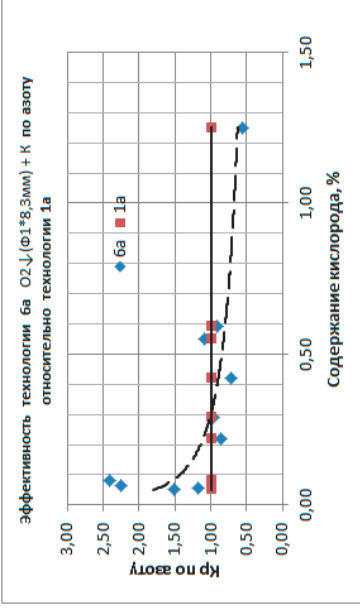
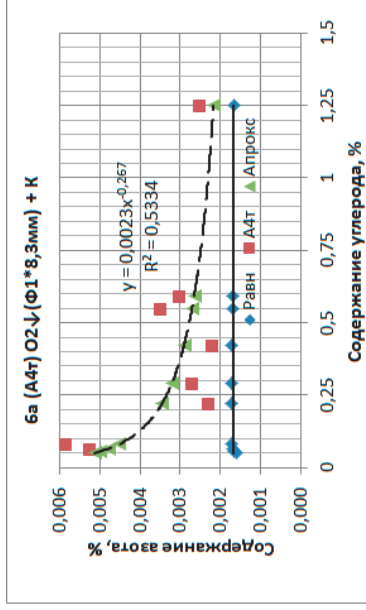
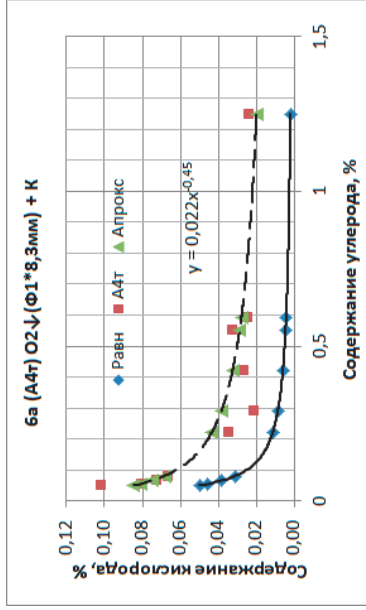


Рисунок 10 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в раславе и результаты их обработки. Технология 6а O2↓(Ф1\*8,3мм) + К

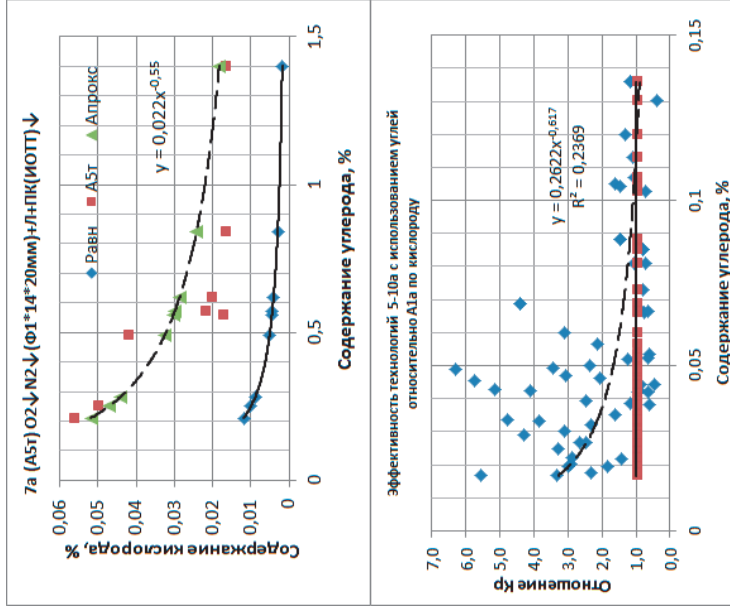


Рисунок 11 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология 7a O<sub>2</sub> ↓ N<sub>2</sub> ↓ (Ф1\*14\*20мм)+Л+ПК(ИОТТ) ↓

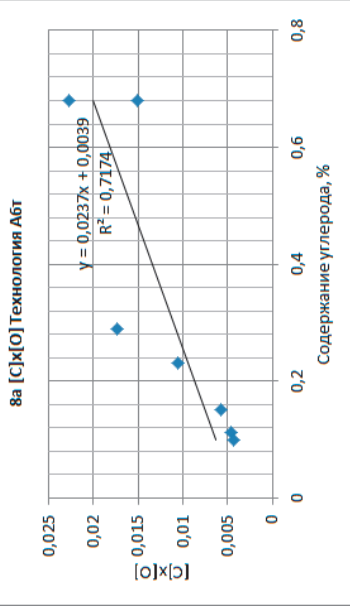
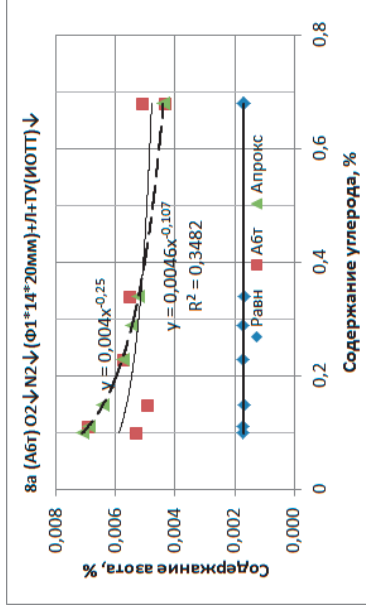
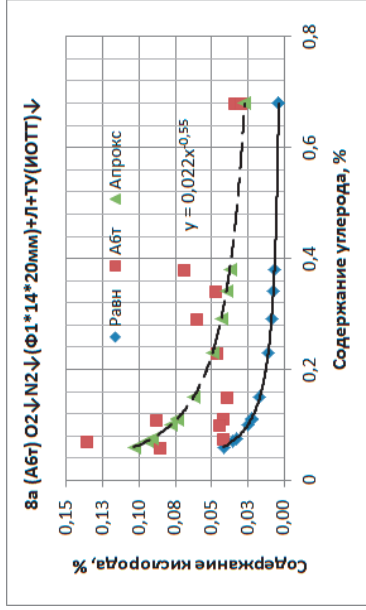


Рисунок 12 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология 8a O<sub>2</sub> ↓ N<sub>2</sub> ↓ (Ф1\*14\*20мм) ↓ Л+Г+У(ИОПТ) ↓

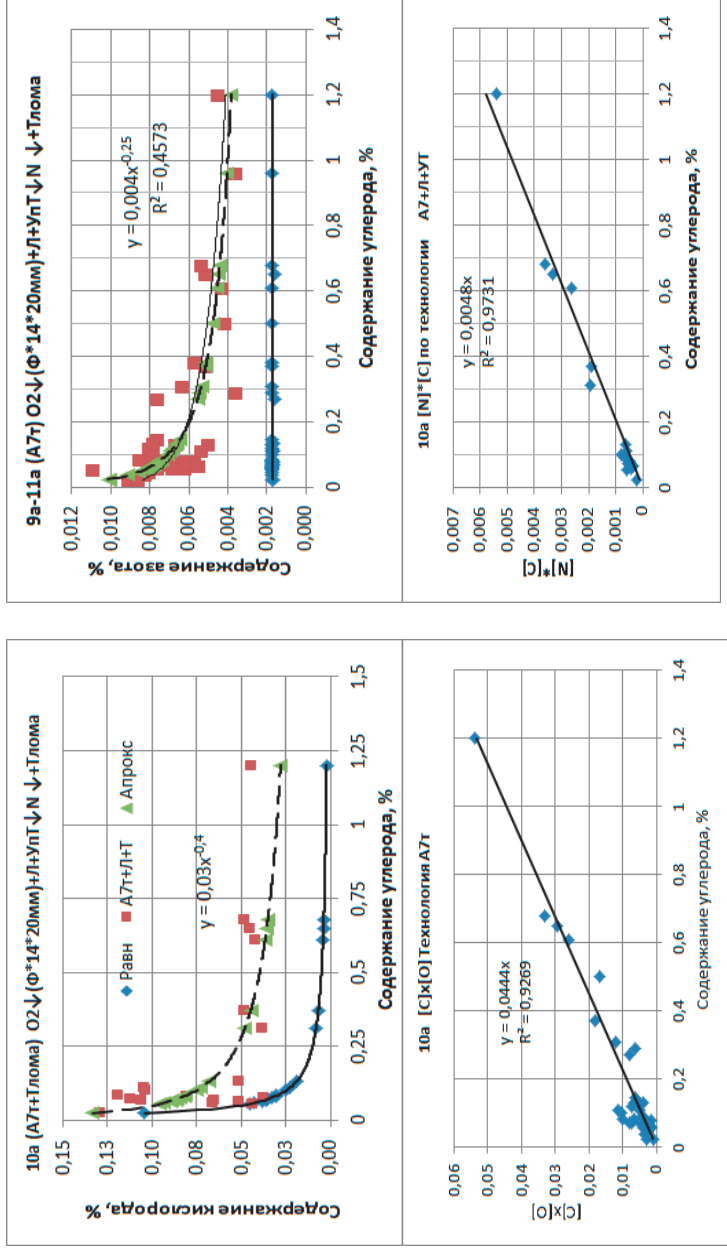


Рисунок 13 – Экспериментальные данные по содержанию кислорода и азота в расплаве и результаты их обработки. Технология 10a [O<sub>2</sub> ↓ (Ф\*14\*20мм) + Ln + УпТ ↓ N ↓ + Глома



Использование углеродосодержащих добавок (различных видов угля) в процессе кислородно-конвертерной плавки приводит к повышенному и нестабильному содержанию кислорода и азота в расплаве, что затрудняет прогнозирование его химического состава. В то же время, вдувание в небольших количествах чистого порошкообразного угля способствует удалению кислорода из расплава, особенно на заключительных этапах плавки. Соотношение кислород-азот в основной период кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой составляет около 10:1. По мере выгорания углерода это соотношение увеличивается до значений 30:1, что свидетельствует о более благоприятных условиях для растворения кислорода в расплаве и его доминирующем положении (рис.14). В то же время, использование угля в процессе кислородно-конвертерной плавки может качественно изменить соотношение кислород-азот при низких содержаниях углерода, что свидетельствует о необходимости более детального исследования этого вопроса.

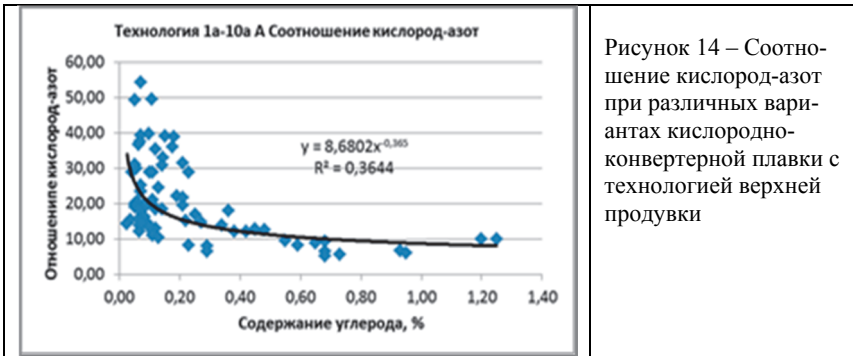


Рисунок 14 – Соотношение кислород-азот при различных вариантах кислородно-конвертерной плавки с технологией верхней продувки

Кислород в расплаве находится в виде оксида железа или углерода на атомном, молекулярном уровнях или в виде газовых пузырей CO. Это подтверждают и данные о составе газов, выделяющихся из слитка при его кристаллизации (рис.15), где фиксируется кислород преимущественно в виде оксида углерода CO.

Использование двухъярусных фурм для дожигания оксида углерода CO до CO<sub>2</sub>, а также подача в расплав небольшого количества углерода (рис.16, технология 11а) способствует уменьшению содержания кислорода в расплаве, что подтверждает раскисляющую роль углерода.

Экспериментально подтверждено, что при применении природного газа и угля может увеличиваться содержание водорода и азота в газовой фазе. При использовании угольного топлива в газовой фазе с большой вероятностью могут появляться составляющие летучих угольного топлива, в состав которых входят следующие газы: H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>m</sub>H<sub>n</sub>, H<sub>2</sub>S и N<sub>2</sub>. Состав и количество летучих зависят от состава и свойств угольного

теплоносителя. В конвертерной стали содержание азота в значительной мере зависит от содержания азота в дутье. При содержании азота в дутье на уровне 0,5% обеспечивается содержание азота в металла 0,004% [4].

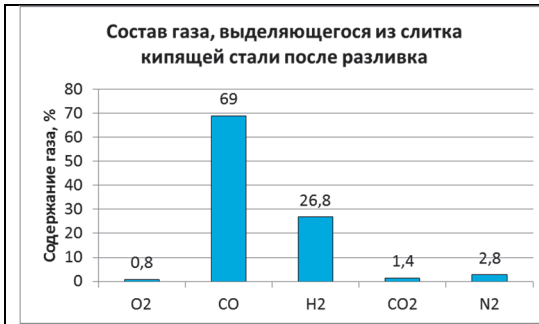


Рисунок 15 – Состав газов, выделяющихся из слитка кипящей стали после разливки.

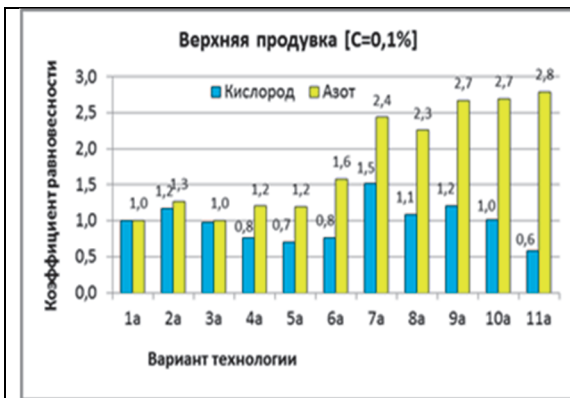


Рисунок 16 – Эффективность различных вариантов кислородно-конвертерной плавки в сравнении с базовой технологией верхней продувки

Результаты конвертерного процесса с использованием комбинированной технологии верхней и донной продувки, как и для чисто верхней продувки, можно оценить с помощью показателя [2]: степени окисления металла, характеризуемой значением произведения  $[C]*[O]$ . Среднее значение произведения  $[C]*[O]$ , установленного для температуры  $1600^{\circ}\text{C}$  и давления  $P_{\text{CO}} = 1$  бар, равно величине 0,0025 (соответствует значению равновесности по уравнению Вачера-Гамильтона), является совершенно «нормальным» результатом для комбинированной продувки конвертера. Это означает, что при содержании углерода 0,04 % в стали содержание кислорода устанавливается в диапазоне 400–800 ppm, что обеспечивается рациональным расходом раскислителей плавки.

Проведенные исследования различных вариантов технологии кислородно-конвертерной плавки показали, что кислород весьма

чувствителен к барботажу ванны, и путем выбора оптимальной технологии можно существенно уменьшить содержание кислорода в расплаве (рис.17).

Содержание кислорода в расплаве при использовании технологии Б комбинированной продувки по варианту продувки «кислород-азот» на 20-30% ниже, чем при верхней продувке. Различия в показателях с верхней и комбинированной продувкой объясняются большей степенью удаления кислорода из расплава за счет донной подачи технологических газов и дополнительного перемешивания ванны.

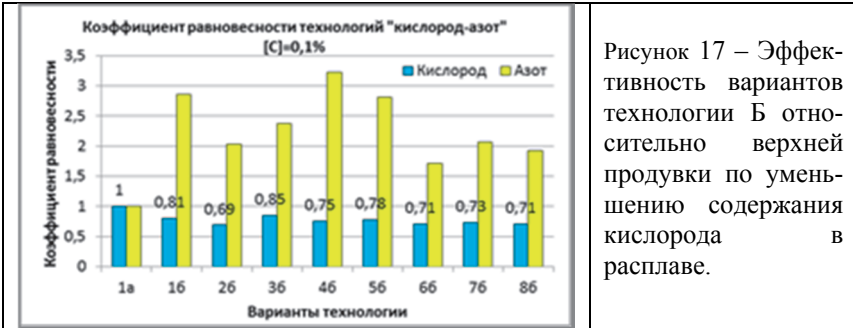


Рисунок 17 – Эффективность вариантов технологии Б относительно верхней продувки по уменьшению содержания кислорода в расплаве.

Содержание азота при этой технологии существенно больше по сравнению с верхней продувкой. Проведенный анализ показал, что усвоение расплавом азота интенсивно происходит даже при малых количествах вдуваемого азота. В целом использование азота при комбинированной продувке приводит к повышению его концентрации в стали на 0,001-0,002%. Использование полукокса и термоугля (из бурых углей) приводит к повышению содержания азота в стали на 0,002-0,003 %.

Достаточно высокая эффективность удаления кислорода из расплава при использовании комбинированной продувки показывает принципиальную возможность модернизации этой технологии путем использования вместо азота альтернативных нейтральных газов. В работе предложено использовать вместо азота выходящий из конвертера конвертерный газ, который состоит из оксида углерода и двуокиси углерода. Исследования, проведенные на 1,5-т конвертере показали, что соотношение этих газов изменяется по ходу продувки (рис.18). Это позволяет подобрать наиболее рациональное соотношение CO и CO<sub>2</sub> для замены вдуваемого в конвертер нейтрального газа или азота.

Технология Б отличается возможностью переработки большего количества лома по сравнению с верхней продувкой. Увеличение доли перерабатываемого лома при комбинированной продувке кислородом сверху и нейтральным газом через днище с обычной и двухъярусной верхней фурмой обусловлено дожиганием отходящего газа в полости конвертера.

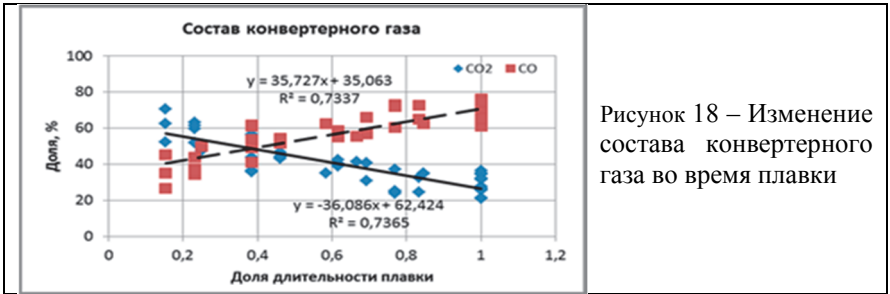


Рисунок 18 – Изменение состава конвертерного газа во время плавки

Существенным эффектом донной продувки, который подтверждается непосредственными измерениями, является пониженное содержание оксидов железа в шлаке, сопровождаемое уменьшением содержания кислорода в стали. Анализ экспериментальных данных показал, что уменьшение содержания кислорода в расплаве на 0,001% приводит к повышению выхода годного на 1 кг/т стали за счет уменьшения количества Fe в шлаке. Это весьма важно, поскольку растворенный в шлаке Fe не восстанавливается и полностью теряется.

Исследования комбинированной продувки по варианту (В) «кислород-кислород» показали, что продувка кислородом снизу обеспечивает интенсивный барботаж ванны и перемешивание расплава, что позволяет обеспечить существенно более низкие содержания кислорода в расплаве.

Уменьшению содержания кислорода и азота в расплаве также способствует использование двухъярусных фурм специальной конструкции (с отдельной подачей кислорода по ярусам при высокой интенсивности продувки) (рис. 19).

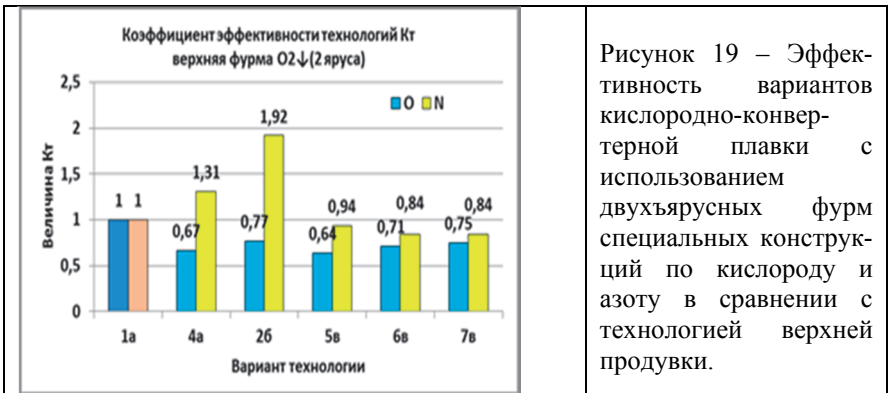
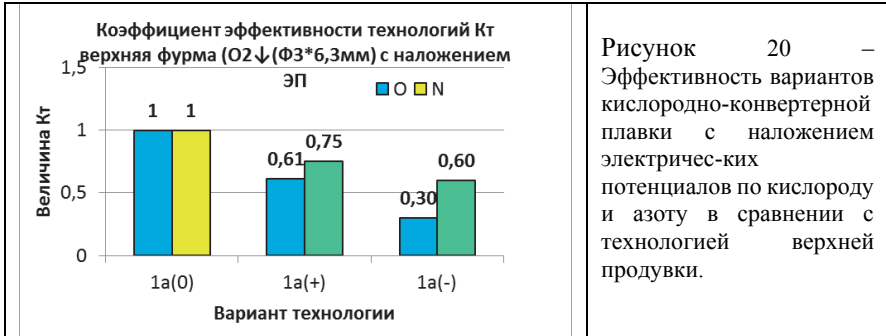


Рисунок 19 – Эффективность вариантов кислородно-конвертерной плавки с использованием двухъярусных фурм специальных конструкций по кислороду и азоту в сравнении с технологией верхней продувки.

Применение внешних электрических воздействий путем подведения электрического потенциала к фурме и сталеплавильной ванне во время окислительного рафинирования способствует получению металла с более

низким содержанием кислорода и азота по сравнению со стандартным процессом (рис.20). При наложении электрических потенциалов на ванну конвертера содержание кислорода в расплаве снижается на 40-70% что, ниже, чем при технологии с верхней продувкой без наложения электрических потенциалов. Содержание азота при этой технологии также существенно, на 25-40%, ниже по сравнению с базовой технологией верхней продувки;



**Заключение.** Таким образом, для всех вариантов кислородно-конвертерной плавки с верхней продувкой показано влияние дутьевых режимов на содержание кислорода и азота в расплаве. Содержание азота и кислорода в расплаве в значительной степени зависит от варианта технологии продувки и использования топлива, которое применяется для повышения доли лома в завалке и при технологии получения металла без применения жидкого чугуна.

Комбинированная продувка по варианту «Кислород-азот» показала существенно меньшие значения по растворимости кислорода, но привела к существенному повышению содержания азота (в 2-3 раза по сравнению с верхней продувкой), особенно при снижении содержания углерода ниже 0,5%.

Комбинированная продувка по варианту «Кислород-кислород» показала существенно меньшие значения по растворимости кислорода и азота в стали на выпуске. Технология обеспечивает более низкие содержания азота в расплаве (на 25-30%) при любых содержаниях углерода в расплаве. Наиболее высокая эффективность этой технологии при выплавке низко и особо низкоуглеродистых сталей. Величина растворимости кислорода по сравнению с верхней продувкой уменьшается на 20-30%, хотя азот остается примерно на одинаковом уровне.

Использование двухъярусных фурм специальной конструкции для дожигания оксида углерода при высокой интенсивности продувки способствует уменьшению количества растворенного кислорода. В этой связи использование многоярусных фурм с отдельными потоками подачи

газов по ярусам может оказаться весьма перспективным, поскольку позволяет также использовать различные виды газов по ярусам фурмы.

Наибольшими возможностями из рассмотренных вариантов кислородно-конвертерной плавки обладает технология верхней продувки кислородом с наложением электрических потенциалов, в т.ч. и на заключительных этапах плавки при выплавке низкоуглеродистых сталей. В частности, величина растворимости кислорода по сравнению с обычной верхней продувкой уменьшается на 40-70%, а азота – на 25-40%. Аналогичные качественные результаты получены в лабораторных условиях как 1,5-тонном, так и в 300 кг конвертере, хотя количественные показатели несколько отличаются.

1. *Явойский В.И.* Теория процессов производства стали. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С. 820.
2. *Теория* процессов производства стали. В.И. Явойский. М.: Metallurgiya, 1967. – С. 791.
3. *Поляков В.Ф., Тубольцев Л.Г., Корченко В.П., Падун Н.И., Семикина А.А.* Влияние технологий кислородно-конвертерной плавки на качественные показатели стали. //Сб. тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2014. – Вып 28. – С.179-195.
4. *Афанасьев С.Г.* Краткий справочник конвертерщика. – М.Металлургия, 1967. – 160 с.

*Статья поступила в редакцию сборника 26.01.2017  
и прошла внутреннее и внешнее рецензирование*

***С.І.Семикін, Л.Г.Тубольцев, В.П.Корченко***

**Поведінка кисню і азоту в розплаві в процесі киснево-конвертерної плавки**

В роботі виконано порівняння ефективності різних технологій і варіантів киснево-конвертерної плавки по можливості досягнення мінімального вмісту кисню та азоту в сталі. Виявлено вплив варіантів киснево-конвертерної плавки з верхньою та комбінованою продувкою на вміст газів у розплаві, що дає змогу ранжувати технології і визначити області їх можливого застосування. Показано, що технологія верхньої продувки киснем з накладанням електричних потенціалів дає змогу зменшити вміст кисню у розплаві на 40-70%, а азоту - на 25-40%.

**Ключові слова:** конвертер, варіанти технології, вміст кисню та азоту в розплаві, порівняння

*S.I. Semykin, L.G. Tuboltsev V.P. Korchenko,*

**Behavior of oxygen and nitrogen in the melt during oxygen-converter heat**

In this paper, the efficiency of different technologies and varieties of oxygen-converter heat has been compared with the aim to achieve the minimum content of oxygen and nitrogen in steel. The quantitative estimation for the technology efficiency has been carried out with the use of the relation of gases in the melt to their equilibrium content at equal carbon contents. The paper reveals the influence of production technology with the combined blowing on the content of gases in the melt. It allows decreasing oxygen content in the metal, however, its influence on the nitrogen content is not simple: nitrogen content can decrease or increase and the determining factor here is the type of the gas introduced from the bottom. The technology of upper blowing with oxygen along with electric potentials application permits the 40-70 % decrease in oxygen within the melt while nitrogen can be 25-40% less.

**Keywords: converter, technology options, oxygen and nitrogen content in the melt, comparison**