

Оригинальная статья

УДК 669.046:662.61.66-971

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-3(53)-82-93

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА
ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ КОНВЕРТЕРНОЙ ВАННЫ ПРИ ВЕРХНЕЙ И
КОМБИНИРОВАННОЙ ПРОДУВКЕ РАСПЛАВА. СООБЩЕНИЕ 2**

© 2025 г. Е. В. Протопопов, С. С. Фатьянов, Е. М. Запольская

Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Повышение энергосберегающей эффективности конвертерных процессов предусматривает использование новых конструкций дутьевых устройств и способов продувки конвертерной ванны. В этой связи чрезвычайно важным является необходимость систематизации ранее полученных сведений и получение новой информации по особенностям развития макрофизических явлений в зоне взаимодействия газовых струй с расплавом, особенностей обезуглероживания и условий выхода на поверхность ванны отходящих газов. С использованием модернизированных методик высокотемпературного моделирования для условий верхней и комбинированной продувки выполнены комплексные исследования процесса обезуглероживания по количественной оценке окисления углерода по ходу конвертерной операции. Проведена оценка окисления углерода в различных реакционных зонах конвертерной ванны. Установлено, что место преимущественного окисления углерода является реакционная зона взаимодействия кислородных струй с ванной. Улучшение перемешивания конвертерной ванны при донной продувке нейтральным газом с расходом 0,01 – 0,20 м³/т·мин сопровождается по сравнению с верхней продувкой снижением переходных концентраций углерода в интервале с 0,9 – 1,2 до 0,4 – 0,5 % начиная с которых неиспользованный на окисление примесей в реакционной зоне кислород начинает интенсивно посткпать вглубь расплава. С понижением концентрации углерода в расплаве ниже 1,0 % в особенности в интервале 0,5 – 0,1 %, подача через днище нейтрального газа приводит к интенсификации процесса обезуглероживания в объеме расплава.

Ключевые слова: конвертер, верхняя и комбинированная продувка, окисление углерода, химическая и температурная неоднородность

Для цитирования: Протопопов Е.В., Фатьянов С.С., Запольская Е.М. Высокотемпературное моделирование процесса обезуглероживания конвертерной ванны при верхней и комбинированной продувке расплава. Сообщение 2. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;3(53):82–93. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-82-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-82-93)

**HIGH-TEMPERATURE SIMULATION OF THE DECARBURIZATION PROCESS OF A
CONVERTER BATH DURING UPPER AND COMBINED PURGING OF THE MELT.
MESSAGE 2**

© 2025 E. V. Protopopov, S. S. Fatyanov, E. M. Zapol'skaya

Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo region – Kuzbass, 650007, Russian Federation)

Abstract. Increasing the energy-saving efficiency of converter processes involves the use of new designs of blast devices and methods of purging the converter bath. In this regard, it is extremely important to systematize previously obtained information and obtain new information on the features of the development of macrophysical phenomena in the zone of interaction of gas jets with the melt, the features of decarbonization and the conditions for the exit of exhaust gases to the surface of the bath. Using upgraded high-temperature modeling techniques for upper and combined purging conditions, comprehensive studies of the decarbonization process were performed to quantify carbon oxidation during the converter operation. The assessment of carbon oxidation in various reaction zones of the converter bath was carried out. It has been established that the place of

predominant carbon oxidation is the reaction zone of interaction of oxygen jets with a bath. Improved mixing of the converter bath during bottom purging with neutral gas with a flow rate of 0.01 – 0.20 m³/t min is accompanied, compared with upper purging, by a decrease in transient carbon concentrations in the range from 0.9 – 1.2 to 0.4 – 0.5%, starting from which oxygen unused for the oxidation of impurities in the reaction zone begins to intensively flow deep into the melt. With a decrease in the carbon concentration in the melt below 1.0%, especially in the range of 0.5 – 0.1%, the supply of neutral gas through the bottom leads to an intensification of the decarbonization process in the melt volume.

Keywords: converter, top and combined purge, carbon oxidation, chemical and thermal heterogeneity

For citation: Protopopov E.V., Fat'yanov S.S., Zapol'skaya E.M. High-temperature modeling of the decarbonization process of a converter bath during upper and combined purging of the melt. Message 2. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;3(53):82–93. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3\(53\)-82-93](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-3(53)-82-93)

Введение

Современные экономические условия, колебания рыночных цен на основные шихтовые материалы определяют необходимость создания новых технологий [1 – 3] и источников сырья при выборе оптимального варианта работы конвертеров. В тоже время несмотря на наличие оригинальных отечественных разработок, в повседневной практике работы конвертерных цехов, как правило, используются традиционные и не отвечающие современному уровню ресурсо- и энергосбережения технологии, дутьевые устройства и агрегаты.

Успешное освоение таких технологических процессов предполагает получение новой информации об особенностях газодинамических и тепломассообменных явлений в реакционных зонах рабочего пространства конвертера при различных вариантах продувки.

Возвращающийся интерес специалистов к использованию малозатратных вариантов комбинированной продувки с использованием донного перемешивания расплава нейтральным газом предполагает получение дополнительной информации об особенностях рафинирования конвертерной ванны, определении места преимущественного окисления углерода и динамики выделения оксида углерода СО на поверхность ванны при различных режимах продувки в связи с необходимостью оптимизации теплового баланса плавки, например, при использовании различных конструкций двухъярусных кислородных фурм для дожигания отходящих газов в полости конвертера [4 – 7]. В работе [8] представлена информация по разработкам и усовершенствованию комплексных лабораторных установок и методик высокотемпературного мо-

делирования, позволяющих с использованием фото- и видеосъемки получать новые данные по механизму процессов в конвертерной ванне при продувке различными технологическими газами.

Методика исследований

Для решения поставленных задач экспериментальной оценки особенностей окисления углерода в реакционных зонах конвертерной ванны при различных способах продувки использована методика двухкамерного конвертера, которая в наиболее простом варианте была предложена в работе [9]. В дальнейшем исследования проводили с использованием модифицированной методики на специально созданной установке на базе 60-кг конвертера [10], приспособленного для верхней или комбинированной продувки расплава (рис. 1).

В соответствии с планом организации экспериментов, как и в работах [11 – 13], плавки по первому варианту проводили с погружением магнетитовой перегородки на 0,020 – 0,030 м в расплав, разделяющей рабочее пространство модели конвертера на две равные по объему камеры [10]. Перегородка совместно с крышкой, устанавливаемой герметично на горловине конвертера, исключала возможность развития процессов взаимодействия в шлаковой и газовой фаз между реакционной (продуваемой кислородом) и сравнительной камерами, но практически не препятствовала переносу тепла и массы в объеме металлической ванны (рис. 1).

Газообразные продукты окисления углерода выходили из камер через калиброванные отверстия в крышке с образованием раздельно горящих факелов, которые фиксировали на видео- и

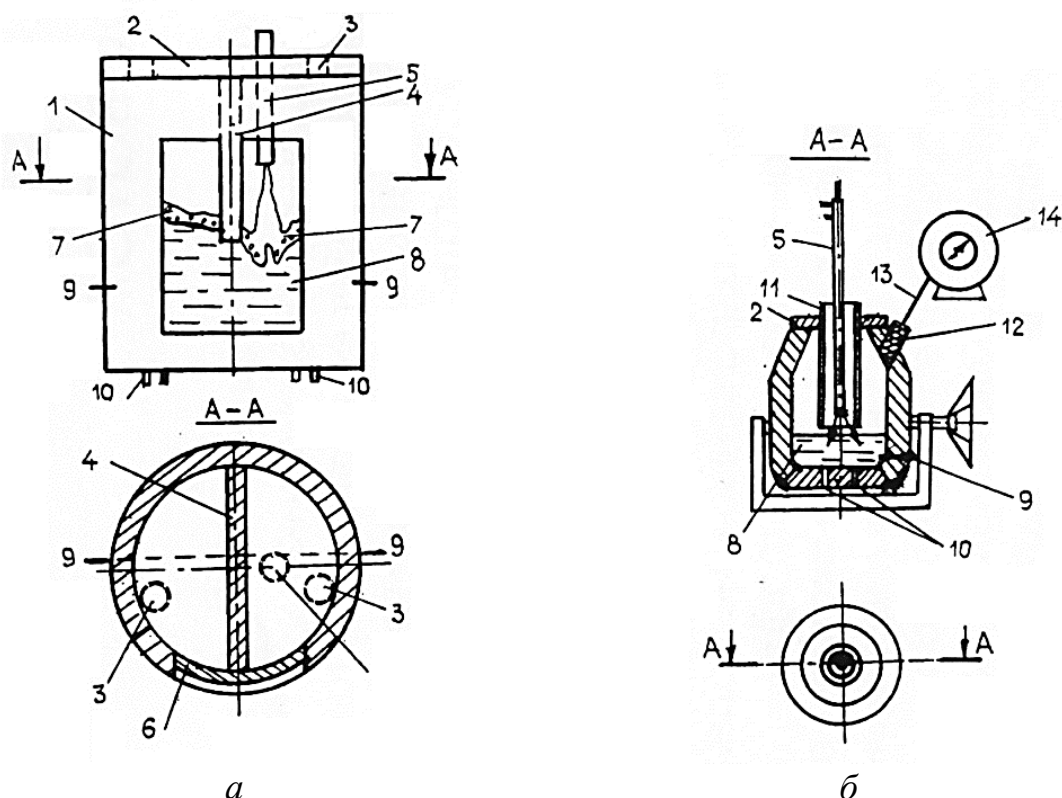


Рис. 1. Схема установки и основные варианты постановки экспериментов по определению места преимущественного окисления примесей при верхней и комбинированной продувках:

1 – конвертер; 2 – огнеупорная крышка; 3 – калибровочное отверстие; 4 – разделительная перегородка; 5 – кислородная фурма; 6 – прозрачная стенка; 7 – шлак; 8 – металл; 9 – термопары; 10 – донные фурмы; 11 – кварцевая труба; 12 – пробка; 13 – металлошланговый рукав; 14 – газовые часы

Fig. 1. Installation diagram and main experimental options for determining the place of predominant oxidation of impurities during upper and combined purging:

1 – converter; 2 – refractory cover; 3 – calibration hole; 4 – dividing wall; 5 – oxygen tuyere; 6 – transparent wall; 7 – slag; 8 – metal; 9 – thermocouples; 10 – bottom tuyeres; 11 – quartz tube; 12 – stopper; 13 – metal hose; 14 – gas clock

киноплёнку с интервалом 30 – 60 с. Измеренная по фотокадрам высота факелов, выраженная в калибрах, характеризовала объём оксида углерода CO, выделяющегося из каждой камеры в рассматриваемый момент плавки, что косвенно характеризовало интенсивность обезуглероживания расплава. В ходе операции осуществляли отбор проб металла и шлака через отверстия в крышке, в том числе после заливки в реакционную камеру порции неокисляющегося индикатора (160 г расплавленной меди), а также фиксировали температуру в обеих камерах на различных горизонтах ванны.

В рассматриваемом случае максимальное число Рейнольдса при истечении потока газа из калиброванного отверстия для условий экспериментов достигало значений порядка 1000 – 2000, то есть численно эта величина была значительно меньше критической, равной 4800 – 5000 при переходе в область турбулентных течений [14], что свидетельствует о ламинарном режиме истечения факела и, следовательно, о возможности оценки процесса обезуглероживания в каждой камере по высоте образующихся факелов

совместно с получаемой информацией по химическому составу отобранных проб металла в рассматриваемый момент по ходу продувки.

Следует отметить, что в этом случае наблюдается прямо пропорциональная зависимость высоты факела ($L_{\text{фак}}$) догорающего оксида углерода CO от числа Рейнольдса [14] и соответственно от скорости (v_c) обезуглероживания ванны. Далее по построенным графикам были выполнены расчеты на основании планиметрирования площадей под кривыми зависимостей высоты факела $L_{\text{фак}} = f$ (длительности продувки), что позволяет сопоставить и количественно оценить процесс обезуглероживания расплава в каждой из камер (реакционной L_p и сравнительное L_c).

Проведенные опытные плавки в конечном итоге обеспечивали возможность установления влияния параметров дутьевого режима на изменение значений переходных ($C_{\text{пер}}$) и критических ($C_{\text{крит}}$) концентраций углерода, которые определяются химическим анализом проб металла, отобранных из сравнительной камеры в момент появления над ней факела догорающего

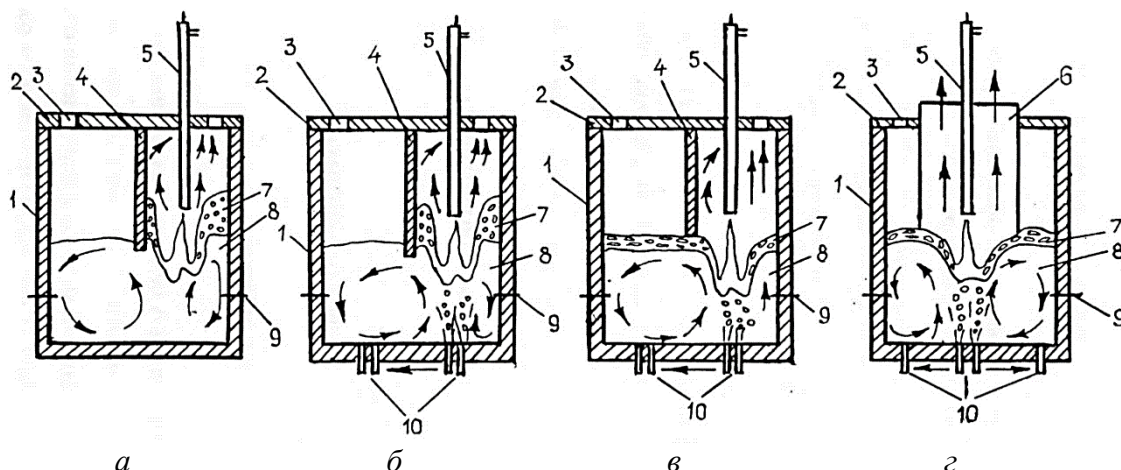


Рис. 2. Варианты постановки экспериментов:

1 – конвертер; 2 – крышка; 3 – калиброванное отверстие; 4 – огнеупорная перегородка; 5 – кислородная фурма; 6 – кварцевая труба; 7 – шлак; 8 – металлическая ванна; 9 – термопара BP 5/20; 10 – донные сопла для подачи азота

Fig. 2. Options for setting up experiments:

1 – converter; 2 – lid; 3 – calibrated hole; 4 – fireproof partition; 5 – oxygen tuyere; 6 – quartz tube; 7 – slag; 8 – metal bath; 9 – BP 5/20 thermocouple; 10 – bottom nozzles for nitrogen supply

оксида углерода ($C_{\text{пер}}$) и начала резкого падения факела ($C_{\text{крит}}$) на завершающей стадии операции.

Отличие второго варианта постановки экспериментов заключалось в том, что с целью обмена образующимся шлаком между камерами нижний торец перегородки располагали незначительно выше над уровнем металлической ванны.

В третьем варианте постановки экспериментов в соответствии с рекомендациями [11 – 13] обеспечивался осесимметричный подвод кислородного дутья к ванне, что отвечало реальным производственным условиям продувки (рис. 1, б). Конвертер оснащали устанавливаемой на горловину крышкой с плотно закрепленной в ней кварцевой трубой, нижний торец которой фиксировали относительно уровня жидкого металла выше на 0,04 – 0,06 м, что способствовало свободному развитию массообменных процессов между реакционной зоной, объемом металлической ванны и шлако-металлической эмульсией. Диаметр кварцевой трубы выбирали в соответствии с характерными размерами реакционной зоны при различных параметрах дутья [15]. Продувку кислородом осуществляли при введении фурмы по центру кварцевой трубы, а улавливание выделяющихся в объеме металлической ванны и шлако-металлической эмульсии газообразных продуктов окисления углерода осуществляли через отверстие, закрываемое пробкой 12 с металлошланговым рукавом 13, ведущим к газовым часам 14 (рис. 1, б). В рассматриваемых условиях без особых осложнений методика двухкамерного конвертера может быть применена для экспериментального определения зоны преимущественного окисления углерода в конвертерной ванне при различных вариантах комбинированной продувки кислородом и

нейтральным газом, для этого в днище агрегата дополнительно устанавливали донные дутьевые устройства.

В серии опытов для визуализации гидродинамических и тепломассообменных процессов, протекающих в каждой из камер конвертера, переднюю стенку агрегата (размером 0,18 × 0,40 м) выполняли из прозрачного кварцевого стекла, а огнеупорная перегородка вплотную примыкала к последнему (рис. 1, а). В отличие от условий экспериментов в работе [16], реакционная зона располагалась в глубине расплава, что позволяло избежать в течение операции продувки разрушения кварцевой стенки и зафиксировать на киноплёнку информацию о вспенивании металла и шлака и циркуляции перегретых объемов расплава.

В четвертом варианте постановки экспериментов (рис. 2, г) обеспечивался осесимметричный подвод кислородного дутья к ванне (рис. 1), а донные сопла для подачи азота располагали как симметрично относительно вертикальной оси конвертера, так и асимметрично в одной из половины днища при подаче в реакционную и сравнительную камеры.

Результаты исследования и их обсуждение

Для всех вариантов проведенных исследований в зависимости от интенсивности окисления углерода в пределах реакционной (Р) или сравнительной (С) камер конвертера, как и в работе [17], также фиксировались четыре характерных периода операции продувки.

Для условий верхней продувки начальный период характеризуется интенсивным окислением шлакообразующих примесей в пределах реакционной камеры с образованием только в ней

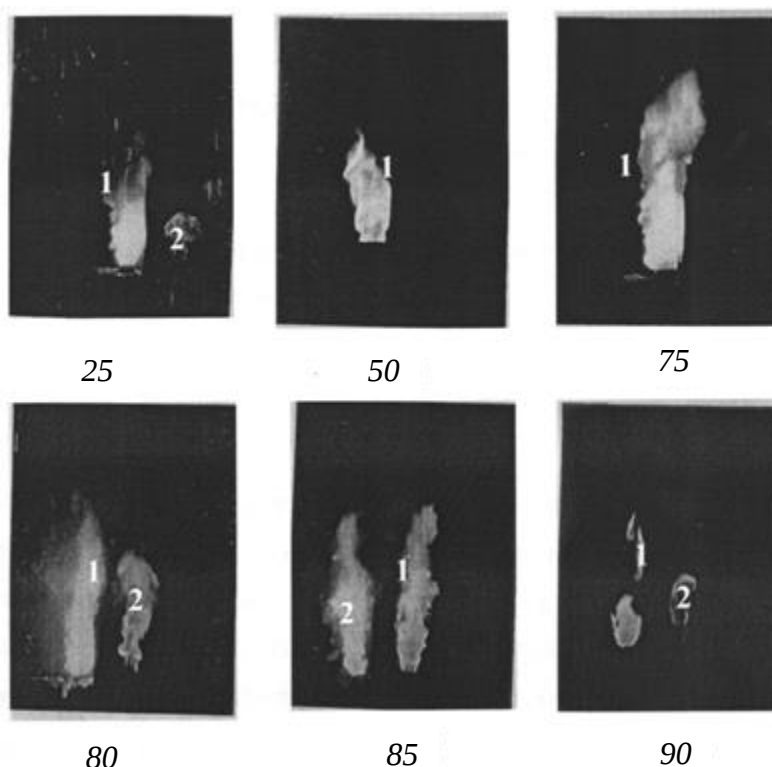


Рис. 3. Динамика образования оксида углерода CO над реакционной (L_p) и сравнительной (L_c) камерами при верхней продувке в соответствии с рис. 2 а (цифрами под фотографиями обозначена длительность продувки, %)
 Fig. 3. Dynamics of carbon monoxide formation with above reaction (L_p) and comparative (L_c) chambers during upper purge according to Fig. 2, a (the numbers under the photos indicate the duration of the purge, %)

шлака со следующим характерным химическим составом: 30,0 – 36,0 % SiO_2 ; 25,0 – 29,0 % MnO ; 15,0 – 23,0 % FeO и 2,3 – 5,2 % Fe_2O_3 . Одновременно только над реакционной камерой появлялся факел догорающего оксида углерода CO (рис. 3), которого высота L_p увеличилась по мере окисления шлакообразующих примесей (Fe, Si, Mn) и повышения температуры ванны. Причем в верхних горизонтах расплава реакционной камеры фиксируется температура на 50 – 110 °C выше по сравнению с остальным объемом ванны, а через «прозрачную» стенку прослеживается перемещение перегретых потоков расплава из реакционной камеры в сравнительную с распространением зоны перегрева расплава на глубину, сопоставимую с глубиной внедрения кислородных струй в металл (рис. 4). Кроме зафиксированных особенностей для начального периода продувки характерны наибольшие градиенты концентраций окисляемых примесей и температуры расплава между реакционной и сравнительной камерами, что, может быть объяснено недостаточным перемешиванием и неоднородностью ванны при воздействии только верхних кислородных струй и незначительным кипением металла за счет выделяющегося из пределов реакционной зоны оксида углерода CO. На поверхности металла в сравнительной камере отсутствует появление формирующегося шлака.

Во второй условно выделенный период продувки в пределах реакционной камеры получает дальнейшее развитие интенсивное окисление углерода при некотором снижении перепада концентраций последнего и температуры расплава между камерами (рис. 3). При зафиксированном изменении концентраций углерода в металле между камерами в пределах 0,06 – 0,40 % продолжается поставка с периферии ванны новых порций металла в реакционную камеру, которая приводит к практически полному расходованию вдуваемого через верхнюю фурму кислорода на обезуглероживание расплава. Отмеченные закономерности подтверждаются наличием факела, догорающего оксида углерода CO только над реакционной камерой (рис. 3) и практическим отсутствием химической неоднородности конвертерной ванны по содержанию кислорода. В указанные периоды плавки (I и II) удалось зафиксировать встречный перенос тепла и массы введенного индикатора (жидкой меди) из реакционной в сравнительную камеры развивающимися направленными циркуляционными потоками расплава.

Проведенные по кадрам видео-киносъемки измерения (рис. 4) позволили определить скорости перемещения границы перегретых потоков расплава из реакционной камеры в сравнительную, величина которых колебалась в пределах

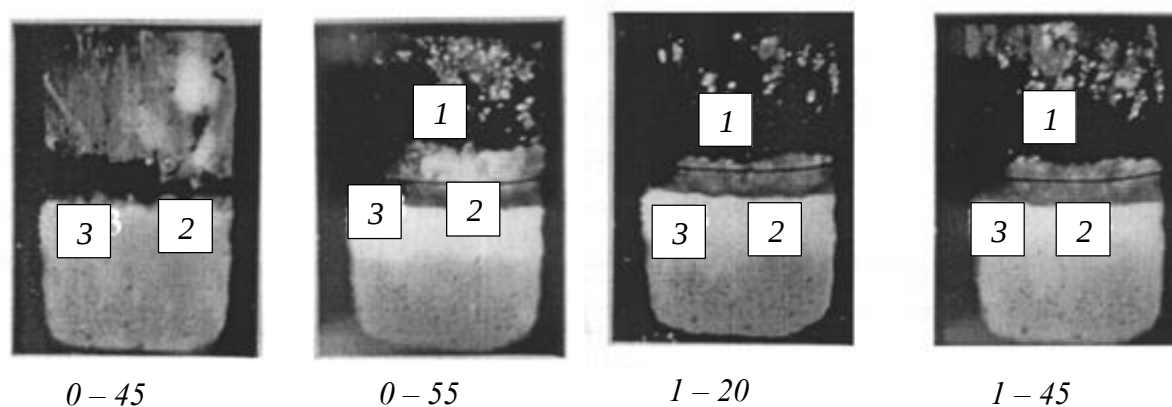


Рис. 4. Характерная картина перемещения перегретых объемов металла из реакционной в сравнительную камеры в начальные периоды (I и II) верхней продувки (цифрами под фотографиями обозначена длительность продувки, %):

1 – перегородка; 2 – реакционная камера; 3 – сравнительная камера

Fig. 4. A characteristic picture of the movement of superheated volumes of metal from the reaction chamber to the comparative chamber during the initial periods (I and II) of the upper purge (the numbers under the photographs indicate the purge duration, %):

1 – partition; 2 – reaction chamber; 3 – comparative chamber

0,10 – 0,25 м/с. При этом время выравнивания концентрации меди между камерами составляло 80 – 95 и 50 – 65 с для начального периода окисления шлакообразующих примесей (I) и интенсивного окисления углерода (II, III). С началом интенсивного массопереноса кислорода из пределов реакционной зоны вглубь расплава до достижения ранее определенных значений переходных концентраций углерода в пределах 0,9 – 1,2 %, наступал условно III период, когда реакция окисления углерода получала развитие и в сравнительной камере при появлении над ней факела догорающего оксида углерода CO (рис. 3). Вследствие интенсивного перемешивания ванны за счет всплывающих за пределами реакционной зоны пузырей CO активно снижается химическая и температурная неоднородность расплава.

В условиях интенсивного перемешивания и дальнейшего развития тепломассообменных процессов фиксируется ускоренное обезуглероживание металла в обеих камерах все же при опережающем развитии окисления углерода в реакционной. Только с понижением концентрации углерода в металле ниже 0,15 – 0,20 % происходило резкое снижение скорости обезуглероживания (IV период) параллельно с падением факелов над обеими камерами (рис. 3). В дальнейшем в результате резкого снижения интенсивности перемешивания ванны вновь возрастал перегрев верхних горизонтов расплава при достижении перепада температур вплоть до 30 – 45 °С.

Проведенные расчеты на основании планирования площадей по кривым зависимости $L_{\text{фак}} = f$ (длительности продувки) подтвердили ранее полученные сведения [17], что на протяжении основного времени продувки при рабочей высоте фурмы 20 – 35 калибров преимущественное окисление углерода до достижения переходных

концентраций развивается только в пределах реакционной зоны. При этом на протяжении всего времени операции до 90 % углерода от всего количества окисляется только в реакционной зоне в условиях отсутствия шлака в сравнительной камере.

Выполненные эксперименты с верхней продувкой с обеспечением свободного массообмена шлаком между реакционной и сравнительной камерами позволили провести количественную оценку степени окисления углерода в области реакционной зоны, поверхности контакта металлической ванны и корольков металла в шлако-металлической эмульсии, а также в объеме металлической ванны на поверхности всплывающих пузырей оксида углерода CO.

Установлено, что площадь поверхности ванны, занятая областью выделения газообразных продуктов обезуглероживания из реакционной зоны, составляла всего порядка 12 – 20 % от всей площади поверхности расплава при реализации режима продувки «заглубленной» струей с погружением фурмы в шлако-металлическую эмульсию.

Таким образом, ранее выполненными работами [8; 12] и проведенными исследованиями подтверждено [4], что независимо от варианта подачи технических газов на продувку на протяжении основного времени операции газовыделение из металлической ванны и шлако-металлической эмульсии совершенно незначительно по сравнению с расчетным количеством газов, которые должны покидать рабочее пространство конвертера. Химический состав газа, выделяющегося из конвертерной ванны в период интенсивного обезуглероживания ванны в среднем составлял 88,0 – 91,9 % CO; 6,8 – 8,2 % CO₂; 1,0 – 1,5 % N₂ и 0,1 % H₂.

Важно отметить, что при продувке в режиме глубокого проникновения дутья в расплав, обезуглероживание ванны происходит только в пределах реакционной зоны. В дальнейшем неувоенный при окислении углерода и других примесей в реакционной зоне кислород в виде оксидов железа циркуляционными потоками переносится в отдаленные участки ванны и перераспределяется между шлаковой и металлической фазами. Это приводит к обезуглероживанию корольков металла, находящихся во взвешенном состоянии во вспененном шлаке, а также зарождению пузырей CO первоначально в подшлаковых слоях ванны и далее с постепенным распространением фронта зарождения пузырей к днищу конвертера и окислению углерода уже в объеме расплава на всплывающих пузырях CO (рис. 4).

Несмотря на появление и существенное развитие в конвертерной ванне новых поверхностей возможного протекания реакции обезуглероживания, все же преобладающая масса углерода продолжает окисляться в реакционной зоне до концентраций последнего в расплаве выше 1 %, а количество окислившегося углерода в объемах шлако-металлической эмульсии и металлической ванны будет несколько возрастает в интервале текущих концентраций при содержаниях углерода 2,5 – 1,0 % C.

При этом поступление кислорода для развития реакции обезуглероживания в отдаленных от реакционной зоны периферийных областях ванны фиксируется только при понижении концентрации углерода в металле ниже 1 % и параллельно будет снижаться возможность поступления углерода со свежими порциями металла в реакционную зону, что хорошо согласуется с ранее полученными данными [17 – 20].

С этого момента доля углерода, окисляющегося в пределах реакционной зоны, начинает интенсивно убывать, а газовыделение в отдаленных участках ванны возрастает и достигает максимума при концентрациях углерода 0,3 – 0,4 %. В дальнейшем по мере снижения концентрации углерода в расплаве и замедления процесса обезуглероживания при концентрациях ниже критических значений, газовыделение из всех зон конвертерной ванны резко уменьшается (рис. 4). Обработкой полученных данных установлено, что преимущественная часть углерода при верхней продувке окисляется в пределах реакционной зоны (75 – 85 % от общего количества) и лишь 15 – 25 % в объемах металлической ванны и шлако-металлической эмульсии.

При исследовании обезуглероживания при комбинированной продувке (рис. 2, б) ход рафинирования чугуна во многом соответствовал

наблюдаемым условиям при традиционной верхней продувке конвертерной ванны. В соответствии с развиваемыми положениями, в этом случае также проявляются четыре характерных периода операции. Независимо от схемы расположения фурм при подаче через днище перемещающего расплава азота в пределах реакционной или сравнительной камер на протяжении периодов окисления шлакообразующих примесей (I) и основного обезуглероживания ванны (II) факел догорающего оксида углерода CO (L_p) фиксируется только над реакционной камерой и в пределах последней образуется шлаковая фаза (рис. 5). При подаче азота в реакционную камеру в сравнительной зоне поверхность металла спокойна и свободна от шлака, а в случае подачи перемещающего газа за пределами реакционной камеры фиксируются незначительные брызги металла в местах выхода газа на поверхность ванны. Установление особенности свидетельствует также о расположении фронта преимущественного окисления углерода и других примесей в пределах реакционной зоны и близлежащих к ней участках шлако-металлической эмульсии.

Установлено, что при комбинированной продувке общий уровень вспенивания ванны в пределах реакционной камеры монотонно повышается по мере окисления шлакообразующих примесей и скорости обезуглероживания (v_c), а затем, достигнув максимального значения к моменту установления наибольшей скорости обезуглероживания 0,30 – 0,35 % (примерно 40 – 50 % времени продувки), остается относительно постоянным до момента резкого падения уровня ванны на завершающем этапе продувки (рис. 6). Наблюдается преимущественное вспенивание кислого шлака, при этом уровень металлической ванны в реакционной камере увеличивается незначительно относительно сравнительной камеры, а само повышение уровня ванны происходит, очевидно, за счет объема, занимаемого зоной продувки, образующимися брызгами и локальным вспучиванием ванны (рис. 6).

При проведении экспериментов с использованием «прозрачной» стенки конвертера фиксируется распространение перегретых потоков металла со скоростью 0,20 – 0,30 м/с, а анализом отобранных проб также определяется перенос введенного индикатора из реакционной в сравнительную камеру. На этом этапе операции подача азота через днище способствует только увеличению скорости поставки окисляемых примесей в реакционную зону и снижению температурной неоднородности расплава в сравнении с обычной верхней продувкой, но не сказывается на развитии процесса обезуглероживания в объеме ванны в целом (рис. 6).

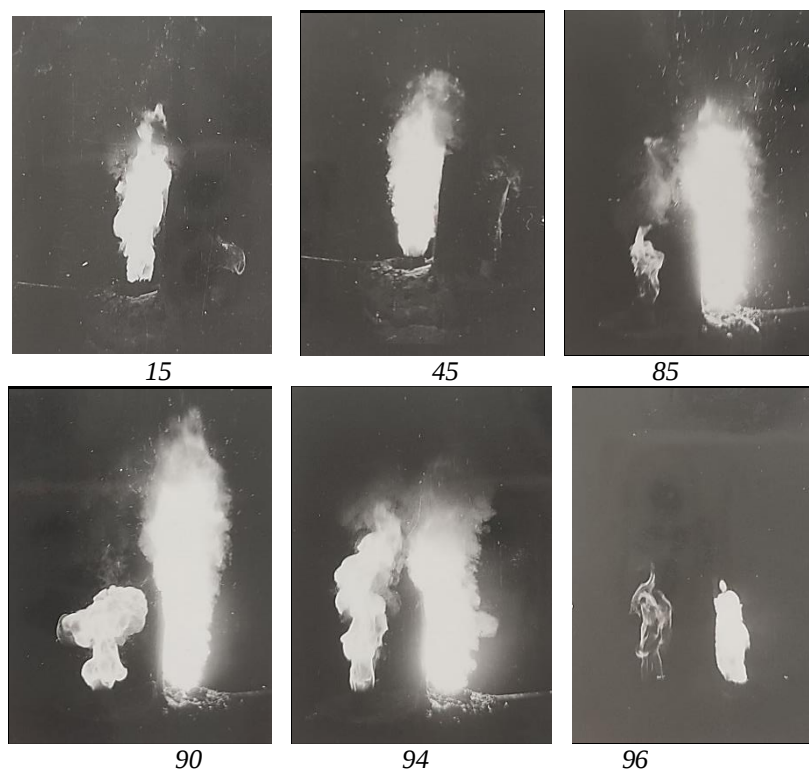


Рис. 5. Динамика образования факелов над реакционной и сравнительной камерами конвертера в характерные периоды комбинированной продувки (в соответствии с рис. 3, б)
 Fig. 5. The dynamics of flare formation above the reaction and comparative chambers of the converter during the characteristic periods of combined purging (in accordance with Fig. 3, б)

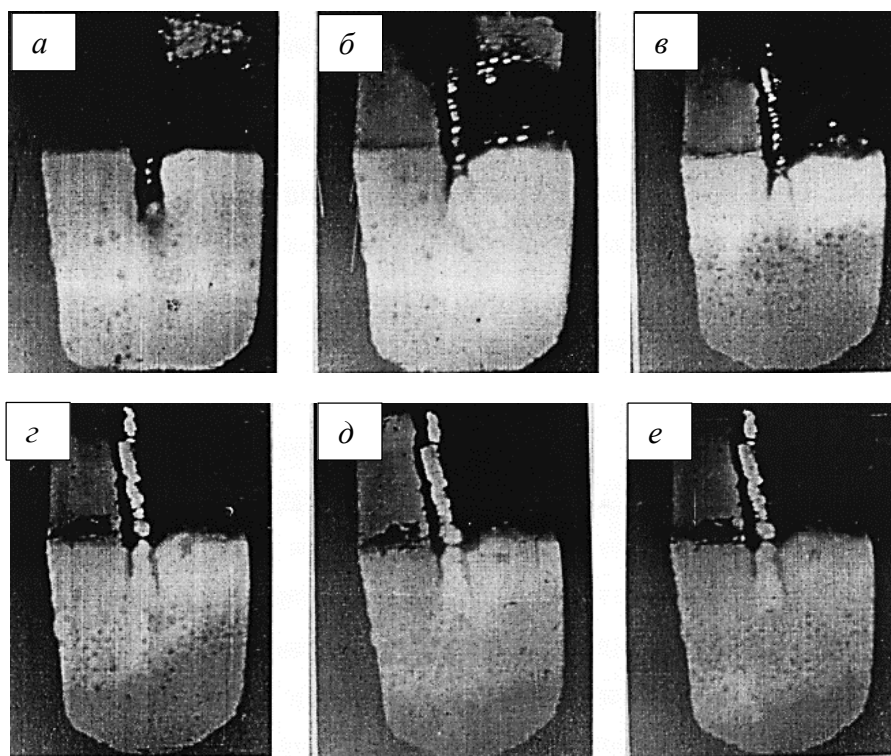


Рис. 6. Картина перемещения перегретых объемов металла из реакционной камеры в сравнительную (при комбинированной продувке в соответствии с рис. 3, б); расход кислорода сверху $3,2 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$; азота через два донных сопла – $0,08 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$; интервал между кадрами 8 с

Fig. 6. The picture of the movement of superheated volumes of metal from the reaction chamber to the comparative one (with combined purging in accordance with Fig. 3, б); oxygen consumption from above is $3.2 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$; nitrogen through two bottom nozzles is $0.08 \text{ m}^3/\text{t} \cdot \text{min}$; the interval between frames is 8 s

Интенсификация перемешивания расплава при донной подаче азота с расходом $0,05 - 0,15 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$ сопровождается по сравнению с традиционной верхней продувкой зафиксированным снижением переходной концентрации углерода в интервале с $0,9 - 1,2$ до $0,45 - 0,50 \%$, начиная с которых неиспользованный в реакционной зоне на реакции окисления кислород интенсивно поступает в объем расплава. С понижением концентрации углерода в расплаве ниже $1,0 \%$ (особенно в интервале $0,5 - 0,1 \%$), подача через днище азота, особенно в пределах сравнительной камеры, приводит к интенсификации процесса обезуглероживания в объеме расплава (период III). В рассматриваемых условиях над сравнительной камерой также появляется факел догорающего СО, что свидетельствует о развитии окисления углерода в отдаленных от реакционной зоны участках ванны, хотя его выделение из реакционной зоны все же остается преобладающим (рис. 5).

Если в течение периода основного обезуглероживания (III) протекающие процессы интенсифицируются благодаря облегчению условий зарождения пузырей оксида углерода СО и увеличения общей реакционной поверхности при взаимодействии поступающего из реакционной зоны кислорода с углеродом отдаленных объемов металла, то с лимитированием хода обезуглероживания доставкой углерода к месту реакции (период IV) при концентрациях последнего ниже критических, происходит резкое уменьшение высоты и последующее исчезновение факела догорающего СО (рис. 5).

При распространении части образующегося высокоокисленного шлака из реакционной камеры в сравнительную (рис. 3, б, в) наблюдалось интенсивное подшлаковое зарождение пузырей СО, при этом фронт зарождения, как правило, не распространялся вглубь расплава при содержании углерода в ванне более 1% (рис. 7). Следует

отметить, что при реализации «мягкой» продувки кислородом при высоком положении фурмы ($60 - 80$ калибров) в период основного обезуглероживания ванны над сравнительной камерой фиксировали незначительный по высоте факел догорающего оксида углерода СО (рис. 8), что может дополнительно свидетельствовать о расходовании оксидов железа на реакцию окисления углерода в образующейся шлако-металлической эмульсии. Обработка полученных данных показала, что для условий комбинированной продувки (рис. 2, б – в) в пределах зоны взаимодействия кислородных струй с ванной окисляется до $80 - 95$ и $60 - 75 \%$ от всего окислевшегося за плавку углерода.

При донном перемешивании азотом перегретые потоки металла в реакционной камере достаточно быстро усредняются с остальными объемами более «холодного» металла, что существенно уменьшает перепад температур между верхними и нижними горизонтами конвертерной ванны в сравнении с верхней продувкой. Указанное обстоятельство хорошо прослеживается по кадрам киносъемки через «прозрачную» стенку при анализе поведения ванны по яркости различных областей расплава, характеризуя его температурную неоднородность (рис. 6).

В целом необходимо отметить, что перемешивание конвертерной ванны нейтральным газом через днище в условиях «жесткой» верхней кислородной продувки практически не сказывается на ходе обезуглероживания за пределами реакционной зоны, поскольку вдуваемый кислород практически полностью расходуется в ее пределах на протяжении большей части времени операции. Следует отметить, что в процессе комбинированной продувки происходит более интенсивное обеднение шлака оксидами железа, что приводит послед ний в «свернутое» жидкотвердое состояние и отрицательно сказывается

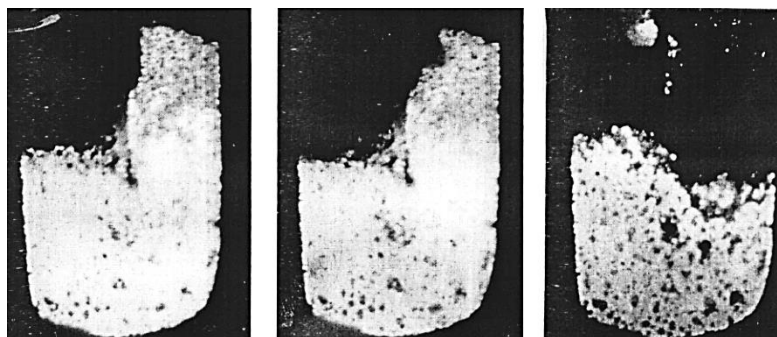


Рис. 7. Картина подшлакового зарождения и выделения пузырей оксида углерода СО в двухкамерном конвертере с прозрачной стенкой (в соответствии с рис. 3, в); расход кислорода сверху – $3,0 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$; зота через два донных сопла $0,08 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$, интервал между кадрами 8 с

Fig. 7. The picture of the subslag nucleation and release of carbon monoxide bubbles in a two-chamber converter with a transparent wall (in accordance with Fig. 3, в); oxygen consumption from above is $3.0 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$; through two bottom nozzles, $0.08 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{мин}$, the interval between frames is 8 s

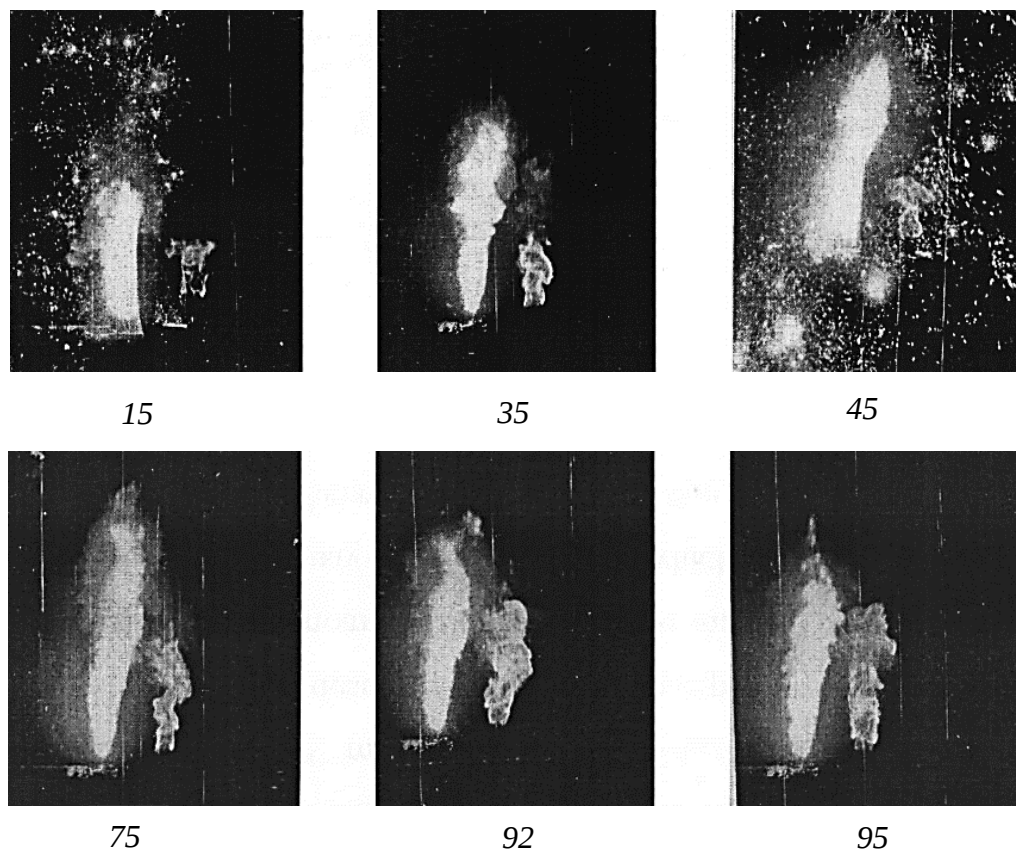


Рис. 8. Динамика образования факелов над двухкамерным конвертером в характерные периоды продувки
(в соответствии с рис. 3, в)

Fig. 8. The dynamics of flare formation above a two-chamber converter during characteristic purge periods (in accordance with Fig. 3, б)

на развитии процесса дефосфорации и способствует интенсивному выносу металла. Донное перемешивание ванны нейтральным газом позволяет более активно перераспределять кислород между металлом и шлаком на реакции рафинирования за пределами реакционной зоны только при повышенном положении фурмы («мягкое» дутье). В данных условиях в объеме ванны важно создавать направленные циркуляционные потоки, обеспечивающие развитие тепло-массообменных процессов и постоянную доставку свежих порций металла в зону окисления, то есть в реакционную зону. Для этого необходимо ориентированно располагать донные фурмы и, соответственно, нейтральные газовые струи относительно кислородных, поскольку возможно создавать взаимно тормозящие конвективные потоки, в особенности в условиях, когда нейтральный газ через днище подается за пределами реакционных зон, образуемых верхними кислородными струями. Так при расположения донных сопел в непосредственной близости к стенкам конвертера (рис. 3, б, в, г) обычно наблюдается более раннее стабильное появление факела догорающего оксида углерода CO над сравнительной камерой уже в диапазоне концентраций $[C] = 1,2 - 1,6 \%$, что свидетельствует только об ухудшении массопотока углерода потоками расплава в реакционную зону (рис. 8). При этом фиксируется возрастание темпе-

ратурной неоднородности между верхними и нижними горизонтами конвертерной ванны. Важным следует считать обнаруженный факт рациональной организации комбинированной продувки при подаче нейтрального газа через днище в расплав только ориентированно под основание реакционных зон, образованных верхними кислородными струями, что будет существенно ускорять восходящие потоки и общую циркуляцию конвертерной ванны.

Выводы

С использованием усовершенствованных методик высокотемпературного моделирования с использованием двухкамерного конвертера выполнены комплексные исследования процесса обезуглероживания количественной оценкой окисления углерода в различных зонах конвертерной ванны при верхней и комбинированной продувке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буданов И.А., Устинов В.С. Перспективы развития металлургического производства в России. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2014;(5(1373)):3–12.
2. Kishimoto Y., Saito N. Development and prospect of combined blowing converter in Japan.

- Tetsu-to-hagane (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan)*. 2014;100(4):445–455.
3. Ogava Y., Maruoka N. Progress of hot metal treatment technology and future outlook. *Tetsu-to-hagane*. 2014;100(4):434–444.
 4. Протопопов Е.В., Щипанов С.С., Фатьянов С.С. Экспериментальные исследования обезуглероживания конвертерной ванны при комбинированной продувке расплава. В кн.: *Сборник трудов XVIII международного конгресса сталеплавателей и производителей металла*. 7-10 апреля 2025. Санкт-Петербург, 2025:182–189.
 5. Lehner J., Egger M.W., Panhofer H., Strelbisky M.J. First operating experiences with post-combustion lances at BOF SHOP LD3. *European Steel Technology and Application Days 2017 (ESTAD 2017)*. Vienna, Austria. 26-29 June 2017. 2017;1(3):1148–1157.
 6. Stone R.P., Neith D., Koester S. et al. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AISTech 2009 Proceedings*. 2009;1:737–747.
 7. Смирнов Л.А., Бабенко А.А., Данилин Ю.А. и др. Освоение технологии комбинированной продувки в 160-т конвертерах. *Сталь*. 2010;5:43–45.
 8. Протопопов Е.В., Уманский А.А., Беленецкий Е.А., Фатьянов С.С., Полежаев С.А., Запольская Е.М. Анализ условий подобия и методики высокотемпературного моделирования конвертерных процессов. Сообщение 1. Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2025;2(52):75–84. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)
 9. Maatch J., Borowski K. Reactions mechanismusjwishen saueratoff und Lad Sei den Sauerstaffaufblas – Verfahren Jus. Stahlhersteebing. *Techn. Mit. Krupp., Porach*. 1964;22(2):63–66.
 10. Разработка и создание испытательного полигона по изучению конвертерных процессов. Отчет по НИР. Сибирский металлургический институт (СМИ). Руководитель Протопопов Е.В. Инв. № 02920005710. Новокузнецк. 1991:64.
 11. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В., Ганзер Л.А. О некоторых особенностях окисления примесей в конвертерной ванне при комбинированной продувке. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1987;4:25–30.
 12. Чернятевич А.Г. Высокотемпературное моделирование кислородно-конвертерного процесса. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;12:16–18.
 13. Охотский В.Б., Чернятевич А.Г., Просвирина К.С. Зона преимущественного рафинирования металла при продувке ванн кислородом. *Сталеплавильное производство*. 1974;3:75–82.
 14. Семикин И.Д., Аверин С.И., Радченко И.И. *Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов*. Москва: Металлургия, 1965:391.
 15. Чернятевич А.Г., Протопопов Е.В. Экспериментальное изучение параметров реакционной зоны конвертерной ванны в условиях комбинированной продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1991;6:17–24.
 16. Баптизмандский В.И., Охотский В.Б. *Физико-химические основы кислородно-конвертерного процесса*. Киев-Донецк: Вища школа. 1981:83.
 17. Протопопов Е.В., Чернятевич А.Г., Юдин С.В. Гидродинамические особенности поведения конвертерной ванны при различных способах продувки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 1998;8:23–29.
 18. Баптизмандский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б. *Конвертерные процессы производства стали*. Киев-Донецк: Вища школа. 1984:344.
 19. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustai nable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
 20. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*. 2004;44(4):770–776. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>

REFERENCES

1. Budanov I.A., Ustinov V.S. Prospects for the development of metallurgical production in Russia. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomiche-skoi informatsii*. 2014;(5(1373)):3–12. (In Russ.).
2. Kishimoto Y., Saito N. Development and prospect of combined blowing converter in Japan. *Tetsu-to-hagane (Journal of the Iron and Steel Institute of Japan)*. 2014;100(4):445–455.
3. Ogava Y., Maruoka N. Progress of hot metal treatment technology and future outlook. *Tetsu-to-hagane*. 2014;100(4):434–444.
4. Protopopov E.V., Shchipanov S.S., Fat'ya-nov S.S. Experimental studies of decarbonization of a converter bath during combined melt purging. In: *Proceedings of the XVIII International Congress of Steelmakers and Metal Manufacturers*. April 7-10, 2025. Saint Petersburg, 2025:182–189. (In Russ.).
5. Lehner J., Egger M.W., Panhofer H., Strelbisky M.J. First operating experiences with post-combustion lances at BOF SHOP LD3. *European Steel Technology and Application Days*

- 2017 (*ESTAD 2017*). Vienna. Austria. 26-29 June 2017. 2017;1(3):1148–1157.
6. Stone R.P., Neith D., Koester S. et al. Further process improvements at Severstal Sparrows Point via new technology implementation. *AISTech 2009 Proceedings*. 2009;1:737–747.
 7. Smirnov L.A., Babenko A.A., Danilin Yu.A. and others. Mastering the technology of combined purging in 160-ton envelopes. *Stal'*. 2010;5:43–45. (In Russ.).
 8. Protopopov E.V., Umanskii A.A., Bele-netskii E.A., Fat'yanov S.S., Polezhaev S.A., Zapol'skaya E.M. Analysis of similarity conditions and methods of high-temperature modeling of converter processes. Message 1. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):75–84. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-75-84](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-75-84)
 9. Maatch J., Borowski K. Reactions mechanismusjwischen saueratoff und Lad Sei den Sauerstaffaufblas – Verfahren Jus. *Stahlhersteering. Techn. Mit. Krupp., Porach*. 1964;22(2):63–66.
 10. Development and creation of a testing ground for the study of converter processes. Research report. Siberian Metallurgical Institute (Mass Media). The head is Protopopov E.V. Inv. No. 02920005710. Novokuznetsk, 1991:64. (In Russ.).
 11. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V., Ganzer L.A. On some features of the oxidation of impurities in a converter bath during combined purging. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 1987;4:25–30. (In Russ.).
 12. Chernyatevich A.G. High-temperature modeling of the oxygen converter process. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 1991;12:16–18. (In Russ.).
 13. Okhotsky V.B., Chernyatevich A.G., Prosvirin K.S. The zone of preferential metal refining during oxygen purging of baths. *Steelmaking industry*. 1974;3:75–82. (In Russ.).
 14. Semikin I.D., Averin S.I., Radchenko I.I. *Fuel and fuel economy of metallurgical plants*. Moscow: Metallurgy, 1965:391. (In Russ.).
 15. Chernyatevich A.G., Protopopov E.V. Experimental study of the parameters of the reaction zone of a converter bath under combined purging conditions. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 1991;6:17–24. (In Russ.).
 16. Baptizmansky V.I., Okhotsky V.B. *Physico-chemical foundations of the oxygen converter process*. Kiev-Donetsk: Vischa school. 1981:83. (In Russ.).
 17. Protopopov E.V., Chernyatevich A.G., Yudin S.V. Hydrodynamic features of the behavior of a converter bath with various purging methods. *Izvestiya vuzov. Ferrous metallurgy*. 1998;8:23–29. (In Russ.).
 18. Baptizmansky V.I., Medzhibozhsky M.Ya., Okhotsky V.B. *Converter processes of steel production*. Kiev-Donetsk: Vischa school. 1984:344. (In Russ.).
 19. Chong Y.T., Teo K.M., Tang L.C. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;56:797–809.
 20. Su F., Lampinen H.-O., Robinson R. Recycling of sludge and dust to the BOF converter by cold bonded pelletizing. *ISIJ International*. 2004;44(4):770–776. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.44.770>

Сведения об авторах:

Евгений Валентинович Протопопов, д.т.н., профессор кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Сергей Сергеевич Фатьянов, магистрант кафедры черных металлов и химической технологии, Сибирский государственный индустриальный университет

Екатерина Михайловна Запольская, к.т.н., с.н.с. лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751

Information about the authors:

Evgenii V. Protopopov, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Ferrous Metallurgy and Chemical Technology, Siberian State Industrial University
E-mail: protopopov@sibsiu.ru
ORCID: 0000-0002-7554-2168
SPIN-код: 9775-0226

Sergey S. Fat'yanov, Master's Student at the Department of Ferrous Metals and Chemical Technology, Siberian State Industrial University

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University
Email: beloglazova-ekat@mail.ru
ORCID: 0000-0002-8098-5895
SPIN-код: 7302-2751

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 23.06.2025
 После доработки 04.08.2025
 Принята к публикации 11.08.2025

Received 23.06.2025
 Revised 04.08.2025
 Accepted 11.08.2025