

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Администрация Правительства Кузбасса

Научно-образовательный центр мирового уровня «Кузбасс»

Сибирский государственный индустриальный университет

**МЕТАЛЛУРГИЯ:
ТЕХНОЛОГИИ, ИННОВАЦИИ, КАЧЕСТВО
*«Металлургия – 2022»***

***Труды
XXIII Международной научно-практической конференции***

23– 25 ноября 2022 г.

Часть 1

**Новокузнецк
2022**

Редакционная коллегия

д.т.н., академик РАН Л.А. Смирнов, д.т.н., доцент А.Б. Юрьев,
д.т.н., профессор С.В. Коновалов, д.т.н., профессор Е.В. Протопопов,
д.т.н., профессор А.Р. Фастыковский, д.т.н., доцент Д.А. Чинахов,
к.т.н. Р.А. Шевченко, к.т.н., доцент О.А. Полях,
к.т.н. Е.Н. Темлянцева, д.т.н., доцент В.В. Зимин

М 540 **Металлургия : технологии, инновации, качество : труды**
XXIII Международной научно-практической конференции.
В 2 частях. Часть 1 / под общ. ред. А.Б. Юрьева, Сиб. гос. индустр.
ун-т. – Новокузнецк : Изд. центр СибГИУ, 2022. – 390 с. : ил.

Труды конференции включают доклады по актуальным вопросам теории и практики металлургических процессов, технологий обработки материалов, автоматизации, ресурсо- и энергосбережения, экологии и утилизации отходов металлургического производства.

Конференция проводится ежегодно.

ОРГАНИЗАТОРЫ И ПАРТНЕРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

АДМИНИСТРАЦИЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА КУЗБАССА
ФГБОУ ВО «СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНДУСТРИАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

АО «ЕВРАЗ ЗСМК»

АО «РУСАЛ-НОВОКУЗНЕЦК»

АО «КУЗНЕЦКИЕ ФЕРРОСПЛАВЫ»

АО «НЗРМК им. Н.Е. КРЮКОВА»

ЛЯОНИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ, Г. АНЬШАНЬ, КНР

ОАО «ЧЕРМЕТИНФОРМАЦИЯ»

ИЗДАТЕЛЬСТВО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН

ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ ВУЗОВ. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ»

ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК СИБГИУ»

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР МИРОВОГО УРОВНЯ «КУЗБАСС»

АО «КУЗБАССКИЙ ТЕХНОПАРК»

СЕКЦИЯ 1: ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 669.184.244.66:536.12.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ГОЛОВКИ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ ПРОДУВКИ В БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ

Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов И.С., Чернышева Н.А.

*Сибирский государственный индустриальный университет,
г. Новокузнецк, Россия, umanskii@bk.ru*

Аннотация. Применительно к условиям большегрузных конвертеров кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» предложена новая конструкция 6-ти сопловой кислородной фурмы с центральным подводом воды и блочным расположением сопел для производства углеродистых сталей ответственного сортамента. Разработана математическая модель, позволяющая выполнять расчеты пространственных температурных полей в объеме наконечника фурмы предложенной конструкции.

Ключевые слова: кислородная фурма, большегрузный конвертер, продувка, стали ответственного назначения, математическая модель, теплоперенос.

MATHEMATICAL MODELING OF THE THERMAL OPERATION OF THE OXYGEN TUYERE HEAD FOR PURGING IN HEAVY-DUTY CONVERTERS

Protopopov E.V., Umanskii A.A., Morosov I.S., Chernysheva N.A.

*Siberian State Industrial University,
Novokuznetsk, Russia, umanskii@bk.ru*

Abstract. In relation to the conditions of heavy-duty converters of the oxygen converter shop No. 2 of EVRAZ ZSMK JSC, a new design of a 6-nozzle oxygen lance with a central water supply and a block arrangement of nozzles for the production of carbon steels of a responsible grade is proposed. A mathematical model has been developed that allows calculations of spatial temperature fields in the volume of the tuyere tip of the proposed design.

Key words: oxygen lance, heavy-duty converter, purging, responsible steel, mathematical model, heat transfer.

В соответствии с современными представлениями эффективная работа дутьевого устройства при выплавке стали в кислородных конвертерах обеспечивает высокие технико-экономические показатели процесса с возможно-

стью нанесения шлакового гарнисажа для повышения стойкости футеровки конвертера. При этом необходимым условием по ходу кампании конвертера должно является обеспечение удовлетворительной стойкости кислородной фурмы [1-3]. В качестве основной причины выхода из строя фурмы отмечается прогар ее наконечника, находящегося в процессе продувки в наиболее теплонапряженных условиях. Вне зависимости от конструкции фурмы прогар наконечника (головки) фурмы происходит, как правило, по сварным швам и сопровождается появлением течи охлаждающей воды с попаданием последней в конвертер, что является аварийной ситуацией.

При замене сварного многосоплового наконечника на цельноточеный или сварной с блочным расположением сопел стойкость конструкции существенно возрастает, особенно при обеспечении эффективного охлаждения межсоплового пространства головки. Достаточно часто такие наконечники выходя из эксплуатации по причине значительной степени разгара центральной части торца наконечника, что сопровождается ухудшением дутьевого режима плавки из-за взаимодействия друг с другом истекающих кислородных струй до встречи с поверхностью конвертерной ванны. Такой режим продувки, как правило, приводит к переокислению шлака и интенсивным выбросам из конвертера.

Как известно, эффективное охлаждение самого цельноточеного наконечника или отдельного солового блока в головке с предотвращением межсоплового разгара может быть достигнуто только путем оптимального подвода и отвода части потока охлаждающей воды с направлением в специально выполненные проточки между соплами.

Для организации надежного индивидуального охлаждения цельноточеных сопловых блоков более прост и предпочтителен центральный подвод охлаждающей воды.

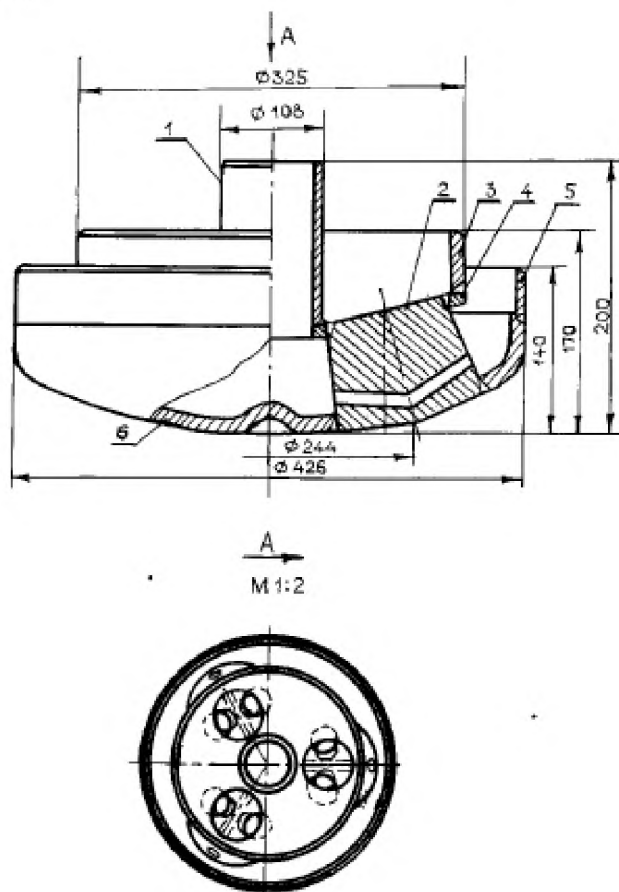
В этой связи для кислородной продувки в 350-т конвертерах кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК» при производстве ответственных марок стали, в том числе шаровых сталей по ТУ 14-1-5236-93, целесообразно использовать новую конструкцию кислородной фурмы (рисунок 1), при проектировании которой использованы технические решения, изложенные ниже.

Расчеты параметров сопел выполнены с использованием известных методик [4-6] с учетом изменения расхода кислорода в пределах 600-1200 м³/мин при отводе конвертерных газов в режиме без их дожигания или с частичным дожиганием. Размещение сопел в блоке и самих сопловых блоков в головке фурмы производили с условием обеспечения одне продувки отдельного существования первичных реакционных зон в объеме расплава, образующихся при внедрении в ванну рассредоточенных кислородных струй. Размеры первичных реакционных зон при выбранных режимах дутья определяли по данным высокотемпературного моделирования с использованием полученных зависимостей.

В процессе исследования спроектировано дутьевое устройство, обеспечивающее компенсацию термических напряжений в фурме путем установ-

ки сальниковых или металлошланговых соединений. Использование новой фурмы потребует модернизации системы установки и крепления дутьевого устройства в продувочном стенде.

В разработанном варианте конструкции 6-ти сопловой головки фурмы (рисунок 1) между верхней и нижней чашами равномерно по окружности под углом 15° к вертикальной оси фурмы посредством сварки закрепляются сопловые блоки (рисунок 2), в каждом из которых выполняется два сопла различного профиля.



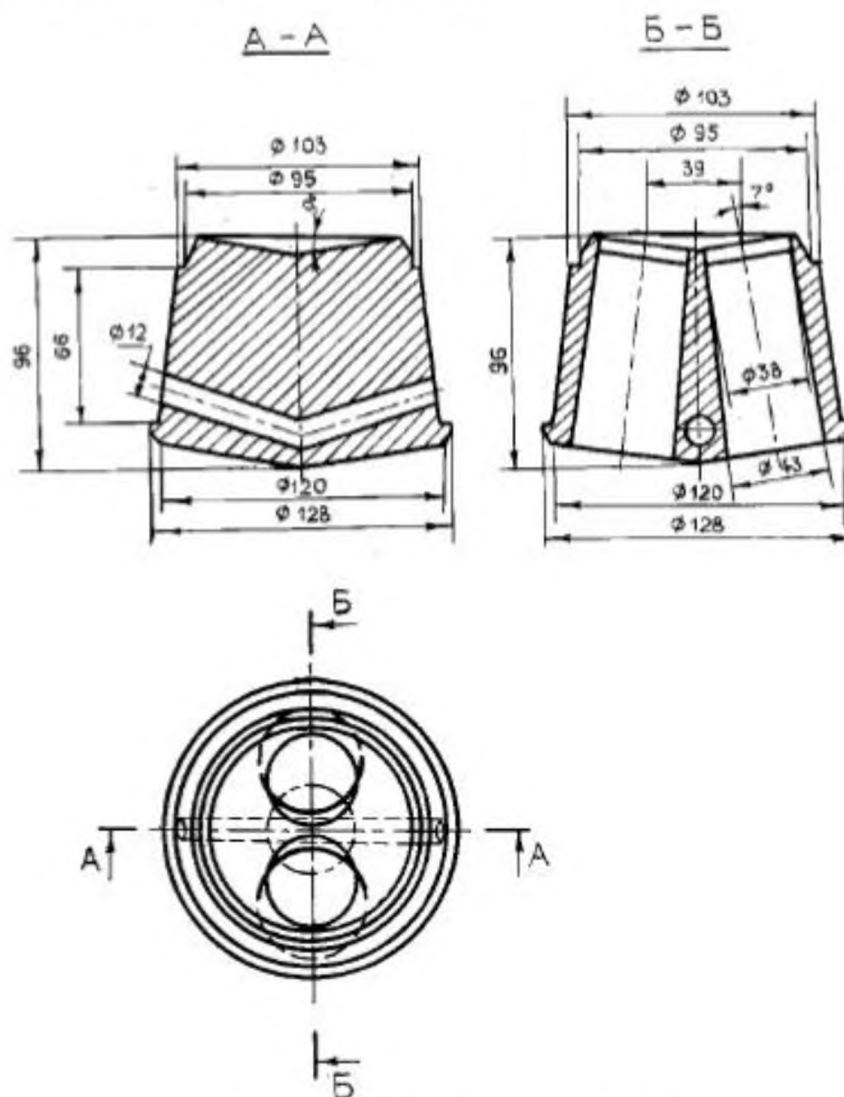
- 1 – труба для подвода охлаждающей воды; 2 – сопловой блок;
3 – разделительная труба; 4 – обойма; 5 – внешняя труба; 6 – чаша

Рисунок 1 – Конструкция 6-ти сопловой головки кислородной фурмы с блочным расположением сопел

Совершенствование конструкции 6-ти сопловой трехблочной фурмы (рисунок 1) обеспечивает продувку с оптимальным расходом кислорода в диапазоне $900-1200 \text{ м}^3/\text{мин}$, при сохранении возможности регулирования расхода кислорода в интервале $600-1200 \text{ м}^3/\text{мин}$ за счет изменения общей длины сопла без снижения эффективности продувки и стойкости головки фурмы, что в максимальной степени соответствует условиям работы кислородно-конвертерного цеха №2 АО «ЕВРАЗ ЗСМК». При этом в каждом из сопловых блоков (рисунок 2) размещается по два сопла Лаваля с критическим диаметром ($d_{кр}$) 38 мм и выходным диаметром ($d_{вых}$) 43 мм, при расположении сопла в плане между собой под углом (γ) 9° к оси блока. В межсопловом пространстве блока для дополнительного охлаждения выполнены

проточки – отверстия диаметром 12 мм (рисунок 2).

Оптимальный расчетный расход воды на охлаждение разработанных конструкций фурм составляет 350-380 м³/ч, при этом разность температур (Δt) на входе и на выходе из фурмы колеблется в пределах 25-30°C в зависимости от периода продувки, а скорость движения охлаждающей воды в межсопловом пространстве головки – 5-7 м/с.

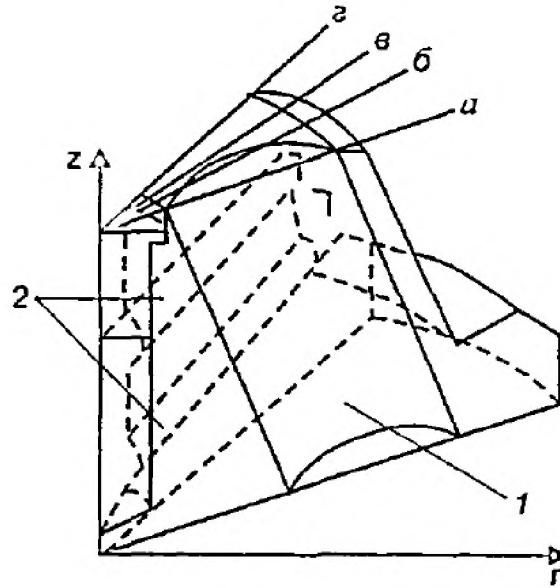


1 – сопло Лавая; 2 – проточки для охлаждающей воды; 3 – сопловой блок

Рисунок 2 – Сопловой блок 6-ти сопловой фурмы

Очевидные трудности экспериментальных исследований температурных полей в объеме водоохлаждаемого соплового блока наконечника фурмы предполагают необходимость использования математического моделирования. Представленная математическая модель позволяет выполнять расчеты пространственных температурных полей в объеме наконечника фурмы предложенной конструкции.

Поскольку рассматриваемый цельноточеный медный наконечник симметричен относительно оси вращения на угол $2\pi/5$, в качестве расчетной области был выбран объемный сектор с угловым размером $\pi/5$ (рисунок 3).



1 – сопло; 2 – проточки для охлаждающей воды; а-г – вертикальные сечения

Рисунок 3 – Расчетная область

Расчет производился в цилиндрических координатах на равномерной разностной сетке с использованием консервативного метода элементарных тепловых балансов [7]. В качестве контрольного объема выбрана элементарная ячейка (рисунок 4).

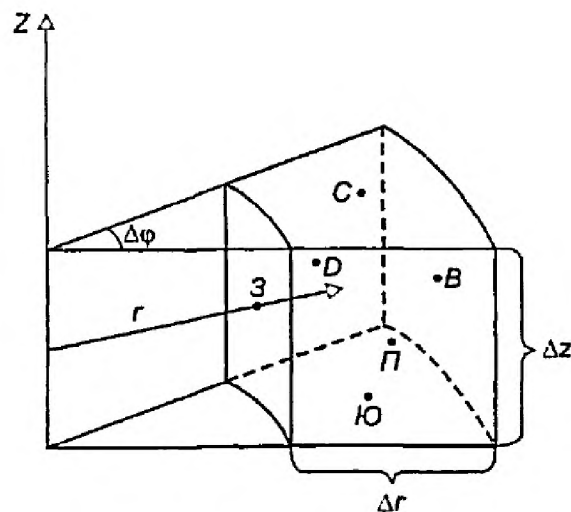


Рисунок 4 – Элементарная ячейка

Объем V и площадь S граней трехмерной ячейки в цилиндрических координатах зависят от расстояния r от центра ячейки до оси:

$$V(r) = r\Delta r\Delta z\Delta\varphi,$$

$$S^3(r) = \left(r - \frac{\Delta r}{2}\right)\Delta z\Delta\varphi, \quad S^B(r) = \left(r + \frac{\Delta r}{2}\right)\Delta z\Delta\varphi,$$

$$S^{Ю}(r) = S^C(r) = r\Delta r\Delta\varphi, \quad S^\Pi(r) = S^D(r) = \Delta r\Delta z$$

Нумерация ячеек производится индексами i, j, k , причем i нумеруют ячейки в направлении изменения радиуса r , j – угла φ , а k – оси z .

Для упрощения задачи граничных условий [8, 9] расчетную область определяли одним слоем элементарных ячеек. Поэтому, в частности, ближайшая к оси симметрии ячейка нумеруются, как $(2, j, k)$. При такой нумерации и с учетом равномерности сетки $r = (1 - 1,5)\Delta r$ приведенные выше формулы можно представить следующим образом:

$$V_i = (i - 1,5)\Delta r \Delta \varphi \Delta z;$$

$$S_i^3 = (i - 2)\Delta r \Delta \varphi \Delta z, S_i^B = (i - 1)\Delta r \Delta z \Delta \varphi;$$

$$S_i^{Ю} = S_i^C = (i - 1,5)\Delta r^2 \Delta \varphi; S_i^\Pi = S_i^Д = \Delta r \Delta z$$

(ввиду отсутствия зависимости от j и k эти индексы не указаны).

Для записи разностного уравнения теплопроводности необходимы отношения площадей боковых поверхностей ячеек к их объему, то есть $\sigma = S/V$:

$$\sigma_i^3 = \frac{i - 2}{1 - 1,5\Delta r} \frac{1}{\Delta r}; \sigma_i^B = \frac{i - 1}{1 - 1,5\Delta r} \frac{1}{\Delta r}; \sigma_i^{Ю} = \sigma_i^C = \frac{1}{\Delta z};$$

$$\sigma_i^\Pi = \sigma_i^Д = \frac{1}{i - 1,5} \frac{1}{\Delta r \Delta \varphi}.$$

С учетом этих отношений температура в центре каждой ячейки вычисляется в момент времени $t = n \cdot \tau$ (где n – количество ячеек; τ – шаг по времени) по явной консервативной разностной схеме:

$$T^{n+1} = T^n - \tau \left[(q\sigma)^B - (q\sigma)^3 + (q\sigma)^C - (q\sigma)^{Ю} + (q\sigma)^\Pi - (q\sigma)^Д \right] / (C_p),$$

в которой q – тепловой поток через соответствующую грань ячейки; C – теплоемкость; ρ – плотность.

Внутри расчетной системы:

$$q_{гр} = \lambda^{гр} (T_i - T_b) / \Delta$$

здесь $\lambda_{гр} = \frac{2\lambda_i \lambda_b}{\lambda_i + \lambda_b}$ – эффективный коэффициент теплопроводности среды

на границе ячейки; Δ – расстояние между центрами ячеек, разделенных рассматриваемой гранью (в приведенных формулах пространственные индексы опущены, а индексы i и b соответствуют значениям переменных при большем и меньшем пространственном индексе соответственно).

Граничные условия в зазорах, по которым движется охлаждающая вода, а также на верхней поверхности головки фурмы заданы в соответствии с работами [10-12]. Для участка верхней части сопел фурмы использовался подход, описанный в настоящей работе; при этом для нижней части сопел,

прилегающих к торцевой поверхности фурмы, в модели учтена возможность попадания на их поверхность излучения от реакционной зоны конвертерной ванны, а также теплового воздействия всплесков шлака и металла с суммарным тепловым потоком, аналогичным тепловому потоку на поверхность фурмы $\sum q = 0,3-7,0 \text{ МВт/м}^2$ [13].

Расчет производился для медной головки фурмы с наружным диаметром 325 мм и геометрическими, которые можно определить в соответствии с рисунками 1, 2. Тепловой поток на поверхность головки фурмы принят 5 МВт/м^2 .

На рисунке 5 представлены результаты расчетов при расходе охлаждающей воды $350 \text{ м}^3/\text{ч}$. Вертикальные сечения, для которых выведены результаты расчетов, равномерно распределены по углу вдоль расчетной области с шагом $\pi/30$. Изотермы 1 соответствуют температуре плавления меди 1083°С , изотермы 2, 3, 4 и 5 соответствуют температурам 500°С , 100°С , 60°С и 40°С соответственно. Исходя из представленных данных наиболее опасной с точки зрения разгара является присопловая часть наконечника.

Результаты расчетов по приведенной модели позволяют оценить вероятность возможного торцевого износа соплового блока для выбранных конструктивных параметров наконечника.

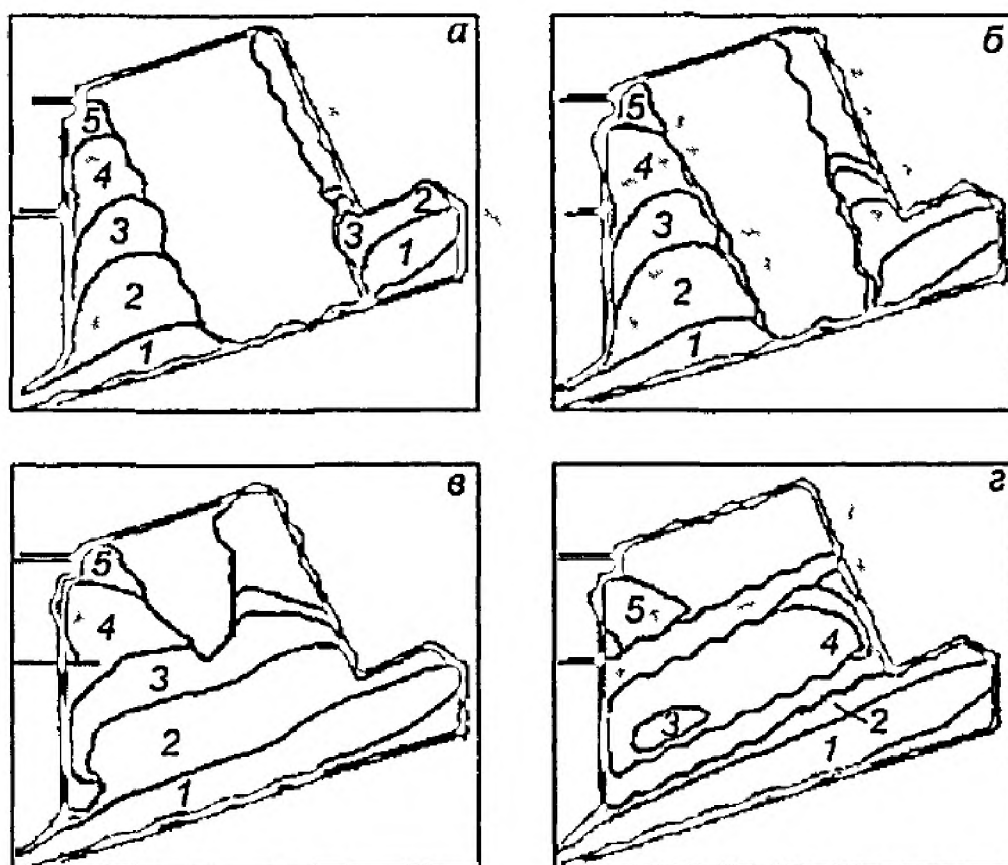


Рисунок 5 – Распределение температурных полей в головке фурмы

Заключение

Предложена новая конструкция 6-ти сопловой кислородной фурмы с центральным подводом воды и блочным расположением сопел для произ-

водства углеродистых марок стали ответственного сортамента.

Разработана математическая модель пространственного расчета температуры в теле соплового блока наконечника верхней кислородной фурмы, позволяющая учитывать сложную геометрию конструкции наконечника.

Библиографический список

1. Современный кислородно-конвертерный процесс / И.И. Борнаций, В.И. Баптизманский, Е.И. Исаев [и др.]. – Киев: Техника, 1974. – 263 с.
2. Тютрин М.Ю., Слободкин Е.М., Сатин А.В. // Черная металлургия. Бюл. НТИ. – 1992. – №3. – С. 22-23.
3. Чернятевич А.Г., Несвет В.В., Зражевский А.Д. [и др.] // Сталь. – 1989. – №2. – С. 32-35.
4. Баптизманский В.И. Конвертерные процессы производства стали / В.И. Баптизманский, М.Я. Меджибожский, В.Б. Охотский. – Киев-Донецк: Вища школа, 1984. – 344 с.
5. Баптизманский В.И. Расчет кислородно-конвертерных фурм / В.И. Баптизманский, Г.А. Щедрин // Сталь. – 1973. – №1. – С. 20-23.
6. Явойский В.И. Теория продувки сталеплавильной ванны / В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх. – М: Металлургия, 1974. – 495 с.
7. Жульковский О.А. // Известия вузов. Черная металлургия. – 2000. – №4. – С. 8-11.
8. Никитенко Н.И. Теория тепломассопереноса. – Киев: Наукова думка, 1963. – 652 с.
9. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е., Надрыгайло Т.Ж. Методы расщепления в задачах гидродинамики и тепломассопереноса. – Днепропетровск: Системные технологии, 2003. – 260 с.
10. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. – М. Энергия, 1981. – 344 с.
11. Исаенко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. теплопередача. – М. Энергия, 1981. – 416 с.
12. Красощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М. Энергия, 1980. – 288 с.
13. Баптизманский В.И., Охотский В.Б., Шибко А.В. // Известия вузов. Черная металлургия. – 1987. – №11. – С. 47-50.

СОДЕРЖАНИЕ

КУЗНЕЦКОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЕ ЛИТЕЙЩИКОВ 90 ЛЕТ <i>Князев С.В., Усольцев А.А., Куценко А.И.</i>	4
СЕКЦИЯ 1: ИССЛЕДОВАНИЯ, ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	13
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОЙ РАБОТЫ ГОЛОВКИ КИСЛОРОДНОЙ ФУРМЫ ДЛЯ ПРОДУВКИ В БОЛЬШЕГРУЗНЫХ КОНВЕРТЕРАХ <i>Протопопов Е.В., Уманский А.А., Морозов И.С., Чернышева Н.А.</i>	13
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ, ПРОИЗВЕДЕННЫХ ИЗ РЕЛЬСОВЫХ СТАЛЕЙ РАЗЛИЧНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА <i>Уманский А.А., Байдин В.В., Симачев А.С., Думова Л.В.</i>	21
АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ КАЧЕСТВА СТРУКТУРЫ НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК ШАРОВЫХ СТАЛЕЙ С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ МЕЛЮЩИХ ТЕЛ <i>Уманский А.А., Протопопов Е.В., Морозов И.С., Симачев А.С., Думова Л.В.</i>	29
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЕРЕРАБОТКИ ШЛАМА КОНВЕРТЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА В КИСЛОРОДНОМ КОНВЕРТЕРЕ <i>Сафонов С.О., Лопатина А.О.</i>	34
ВОЗМОЖНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ КРЕМНИСТЫХ ФЕРРОСПЛАВОВ ИЗ ФОСФАТНОГО СЫРЬЯ <i>Шевко В.М., Утеева Р.А., Лавров Б.А., Полатова К.М., Каратаева Г.Е.</i>	38
ПЕРЕРАБОТКА БОГАТЫХ ПЫЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОМАРГАНЦА С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ <i>Шевко В.М., Айткулов Д.К., Синельников И.П., Удалов Ю.П., Бадикова А.Д.</i>	45
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА ПЯТИКОМПОНЕНТНОГО ЭКВИАТОМНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Co-Cr-Fe-Mn-Ni <i>Панченко И.А., Дробышев В.К., Бессонов Д.А., Кольчурин М.А., Коновалов С.В.</i>	55
ВЫПЛАВКА ЧУГУНА ДЛЯ СМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ИЗЛОЖНИЦ В ИНДУКЦИОННЫХ ПЕЧАХ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ЕМКОСТИ <i>Лубяной Д.Д., Кузнецов И.С., Кухаренко А.В., Князев С.В., Лубяной Д.А.</i>	62
ИССЛЕДОВАНИЕ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ АГЛОМЕРАЦИИ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ МАТЕРИАЛОВ <i>Бурова Ю.Е., Вязникова Е.А., Дмитриев А.Н., Витькина Г.Ю., Алекторов Р.В.</i>	70
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВОК K_2O , Na_2O , MgO , Al_2O_3 НА СВОЙСТВА ШЛАКА ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ <i>Гизатулин Р.А., Дунашин Н.С., Валуев Д.В., Худоёров С.С., Заиркулов Э.Ё.</i>	79
КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ЛЕГИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ В АТМОСФЕРЕ АНОДНЫХ ГАЗОВ АЛЮМИНИЕВЫХ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРОВ ЭКОСОДЕРБЕРГ <i>Пинаев Е.А., Темлянцева М.В., Большаков Д.Г., Темлянцева Е.Н., Куценко А.И.</i>	87
КИНЕТИКА ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СМОЛОСВЯЗАННЫХ ОГНЕУПОРОВ ДЛЯ ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ <i>Якушевич Н.Ф., Запольская Е.М., Темлянцева М.В., Протопопов Е.В., Темлянцева Е.Н., Приходько М.С.</i>	92
ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА ВЫПЛАВКИ ФЕРРОСИЛИКОМАРГАНЦА <i>Павлов В.В., Романенко Ю.Е., Годик Л.А., Фейлер С.В., Фейлер Д.Т.</i>	98