

## ТЕМПЕРАТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ В РАБОЧЕМ ПРОСТРАНСТВЕ СОВРЕМЕННОЙ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Проанализировано распределение температур в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи фирмы «Danieli» с радиальным расположением топливосжигающих устройств. Сделан вывод о значительной неравномерности температурного поля, предложено изменить расположение газокислородных горелок на тангенциальное. Компьютерным моделированием получено распределение температур в рабочем пространстве дуговой сталеплавильной печи для радиального и тангенциального расположения топливосжигающих устройств.

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь (ДСП), температура, топливосжигающие устройства (ТСУ), температурное поле.

Последним достижением в совершенствовании ДСП для получения максимальной производительности, по данным компании «Siemens VAI», являются печи серии «Ultimate». Это современный тип ДСП, имеющий несколько принципиальных отличий и особенностей: увеличенный объем рабочего пространства за счет изменения высоты стен; загрузка шихты одной бадьей; использование комбинированных и газокислородных горелок, фурм для дожигания СО в отходящих газах и инжекторов порошкообразных углеродсодержащих материалов [1]. С позиции применения разнотипных энергоносителей современную ДСП следует рассматривать как комплексный тепловой объект, в котором совместно используют электрическую энергию, газообразное топливо и окислитель по способу пламенных сталеплавильных печей, а также твердое топливо (кокс) по принципу карбюраторного процесса [2]. Включение в работу газокислородных горелок, кислородных фурм, инжекторов порошкообразных материалов существенно влияет на температурное состояние в рабочем пространстве печи.

По нашему мнению, многие реализуемые технические решения (к примеру, фирмы «Danieli») относительно размещения специальных энергоподводящих элементов на стенах и в эркере печи предназначаются исключительно для повышения производительности печи, но в полной мере не обеспечивают высокого

уровня теплоиспользования. Отсутствуют условия для создания дополнительной рассредоточенной теплоотдачи в зонах с недостаточным подводом тепла к материалам холодной шихты.

В процессе работы топливокислородных горелок преобладающую роль имеет конвективная передача тепла, поскольку газокислородный факел обладает малой излучательной способностью, а легковесная шихта характеризуется низкой начальной температурой и развитой поверхностью для теплообмена с продуктами горения. Помимо прочего, конвективная теплоотдача функционально зависит от скорости и кинематической вязкости продуктов горения, условий аэродинамического взаимодействия с тепловоспринимающей поверхностью. Распространившиеся способы подвода теплоты газокислородными горелками на действующих и предлагаемых печах по условиям теплопередачи не совсем рациональны [3]. Для создания однородного температурного поля на поверхности шихты, находящейся в промежутке между электродами и внутренней поверхностью стен ДСП, потребуется изменить схему (способ) установки энергоподводящих элементов, следуя рекомендациям [3, 4].

Экспериментальное измерение температуры и наблюдение за ее распределением в объеме печи практически неосуществимо, но возможно благодаря доступности современных методов компьютерного моделирования. Решение интересующей нас задачи было найдено путем расчета математической модели в пакете SolidWorks Flow simulation.

Для определения температурного состояния ДСП для модели были установлены следующие граничные условия:



Г. В. Воронов  
E-mail: amv\_ru@mail.ru

– начальная температура продуктов горения на входе в объект (срез сопла горелки) определена стехиометрическим расчетом горения природного газа в кислороде и составила 2700 °С;

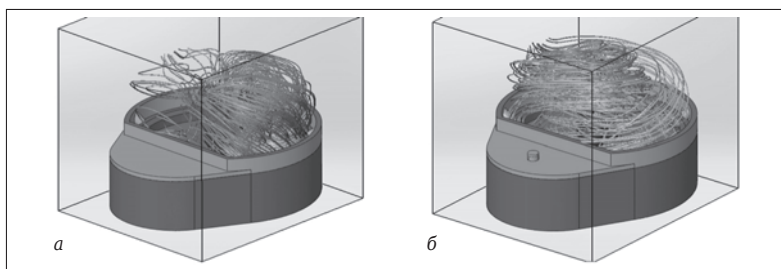
– температура на выходе из объекта (срез дымоотводящего канала) из анализа статистических данных [5] принята равной 1600 °С;

– теплоотдача от газов к шихте постоянна и равномерно рассредоточена по рассматриваемому объему.

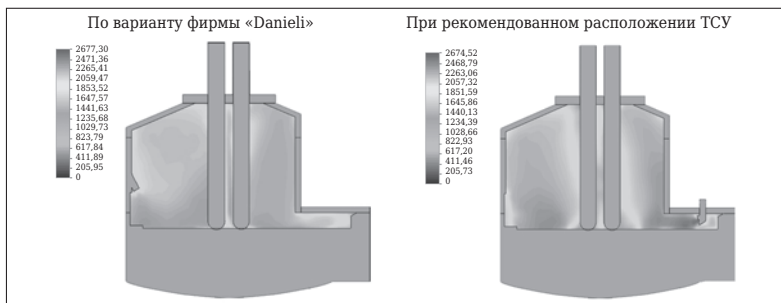
Для снижения вычислительной нагрузки не рассматривалось тепловыделение от электрических дуг и химических реакций в расплавляемой шихте.

На рис. 1, б можно наблюдать за расположением изотерм для предложенного авторами [3, 4] варианта установки газокислородных горелок. Температурное состояние в объеме рабочего пространства печи стало упорядоченным, подобным распределению аэродинамических потоков [4].

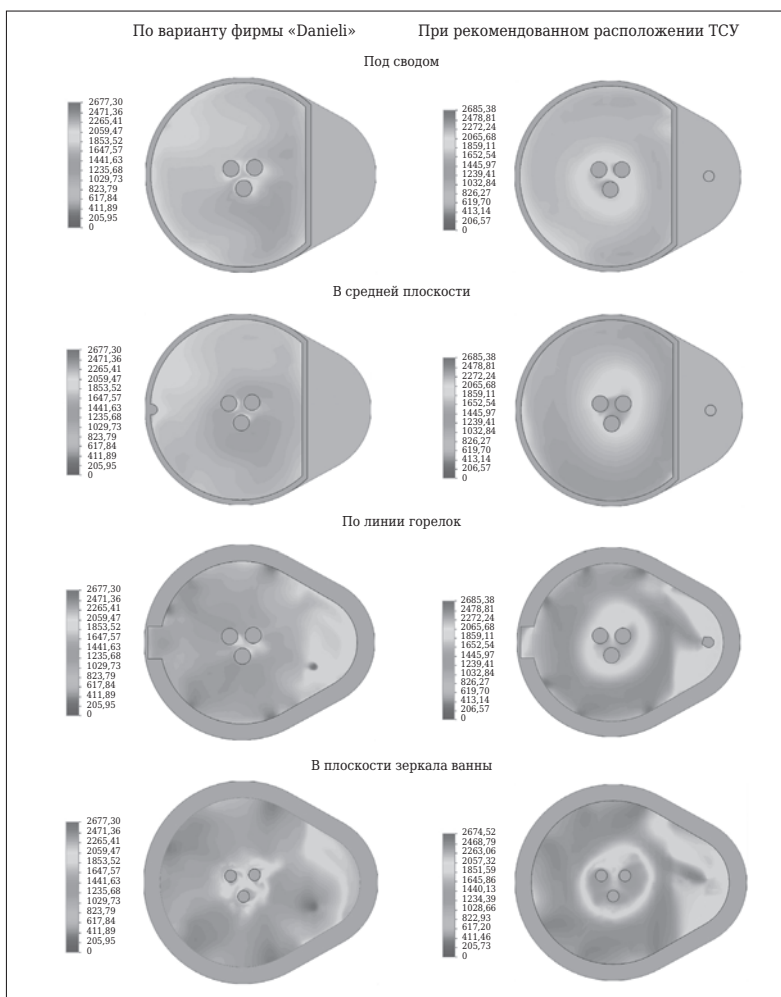
На рис. 2 и 3 показано поле температур в продольном осевом сечении и в горизонтальной плоскости печи. Температурное поле внутри печи неоднородно. Очевидно, что радиально направленные факелы горелок формируют область высоких температур в центральной части объема печи. Часть поверхности электрода, обращенная наружу (навстречу факелу), подвергается интенсивному разогреву направленным потоком высокотемпературных газов. Только в области межэлектродного пространства при слабом движении газов сохраняется узкая область относительно низких температур (см. рис. 2). Неравномерность распределения температур присутствует и по всей высоте внутреннего объема печи (см. рис. 3). Локальный перегрев электрода на отметке расположения горелочных устройств может вызвать



**Рис. 1.** Траектории движения газовых потоков в объеме рабочего пространства: а — по варианту фирмы «Danieli»; б — при рекомендованном расположении ТСУ



**Рис. 2.** Поле температур в продольном осевом сечении печи



**Рис. 3.** Поле температур в горизонтальном сечении рабочего пространства

его деформацию и поломку. Направленное действие высокотемпературных газов приводит и к повышенному массообмену продуктов горения ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ) с углеродом электродов.

Существующее расположение (вариант фирмы «Danieli») топливосжигающих устройств (ТСУ) обеспечивает высокотемпературное поле только вблизи зон их установки. Равномерного распределения температур на всей поверхности шихты не наблюдается по объективным причинам. В эркерной зоне и на участках между горелками обнаружены плохо прогреваемые поверхности, тогда как вблизи зон установки горелок происходят перегрев и выгорание шихты. Печь имеет значительные тепловые потери, поскольку наблюдается сосредоточение высоких температур поверхности водоохлаждаемых стен и свода печи.

Тангенциальное расположение горелок, предлагаемое авторами настоящей статьи, изменило траекторию потоков продуктов горения [3] и вместе с тем распределение температур в объеме печи. Горизонтальная циркуляция газов повысила эффективность конвективного теплообмена, способствовала равномерному распределению температур у поверхности шихты и по всей высоте рабочего пространства

(см. рис. 2 и 3). Отмечается заметное снижение температуры в центре печи. Наиболее высокие температуры обеспечиваются в нижней части объема печи, а зона высоких температур распространяется практически на всю поверхность загруженной шихты. Благодаря использованию поворотной горелки улучшается прогрев эркерной зоны печи.

При сопоставлении температурных полей двух вариантов размещения ТСУ видно, что существенно снижается воздействие продуктов горения на электроды. Также уменьшается контакт высокотемпературных газов с поверхностью водоохлаждаемых конструкций печи. Рассредоточенный подвод и организованное движение продуктов горения в печи обеспечивают высокий температурный уровень на поверхности шихты, ее интенсивный нагрев при высоком уровне теплоиспользования.

Следует отметить, что предложенный способ дополнительного нагрева и плавления шихты позволяет без изменения номинальной электрической мощности и при незначительных конструктивных изменениях получить высокую производительность по полупродукту стали, снижение удельного расхода электродов и обеспечить надежную эксплуатацию стеновых панелей и свода.

### Библиографический список

1. **Белковский, А. Г.** Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкции / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Черная металлургия : Бюл. ин-та «Черметинформация». — 2013. — № 3. — С. 72–78.
2. **Старцев, В. А.** Скрап-карбюраторный процесс при производстве стали в мартеновских печах / В. А. Старцев, Г. В. Воронов, В. И. Лобанов [и др.]. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. — 225 с.
3. **Воронов, Г. В.** Особенности аэродинамики в рабочем пространстве современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, О. В. Порох // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 19–21.

**Voronov, G. V.** Aspects of the aerodynamics in the working space of a modern electric-arc steelmaking

furnace / G. V. Voronov, M. V. Antropov, O. V. Porokh // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 285–287.

4. **Воронов, Г. В.** Газодинамика рабочего пространства современной дуговой сталеплавильной печи / Г. В. Воронов, М. В. Антропов, И. В. Глухов // Новые огнеупоры. — 2014. — № 11. — С. 23–25.

5. **Гудим, Ю. А.** Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы : монография / Ю. А. Гудим, И. Ю. Зинуров, А. Д. Киселёв. — Новосибирск : НГТУ, 2010. — 547 с. ■

Получено 03.12.14

© Г. В. Воронов, М. В. Антропов, О. В. Порох,  
И. В. Глухов, В. А. Гольцев,  
2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



## 第九届先进陶瓷国际研讨会

### The Ninth International Conference on High-Performance Ceramics

## 9-я Международная конференция по высокотехнологичной керамике (CICC)

### 4–7 ноября 2015 г.

www.ccs-cicc.com/CICC-9

г. Гуилинь, Китай