

Висновки

- ✓ розроблено Математичну модель взаємодії веж та юнітів, однокодового типу й рівня;
- ✓ побудовано матрицю гри для випадку взаємодії веж та юнітів однакового типу з врахуванням 4 параметрів;
- ✓ отримано варіанти стратегії для веж та юнітів однакового типу
- ✓ розподілено стратегії відносно рівнів складності гри.

ЛІТЕРАТУРА

1. Баланс в играх жанра Tower Defense (часть 1) [Електронний ресурс] / Хабрахабр – Режим доступу: <http://habrahabr.ru/post/173913/>
2. Баланс в играх жанра Tower Defense (часть 2) [Електронний ресурс] / Хабрахабр – Режим доступу: <http://habrahabr.ru/post/176355/>
3. Использование AI и утилит при разработке игр жанра Tower Defense [Електронний ресурс] / Хабрахабр – Режим доступу: <http://habrahabr.ru/post/189198/>
4. Understanding Tower Defense games [Електронний ресурс] / – Режим доступу: <http://www.loopinsight.com/2010/03/30/understanding-tower-defense-games/>
5. Computational Intelligence and Tower Defence Games [Електронний ресурс] / Phillipa Avery Department of Computer Science and Engineering / University of Nevada, Reno, USA. – Режим доступу: <http://julian.togelius.com/Avery2011Computational.pdf>
6. Tower Defense – Википедия [Електронний ресурс] / – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Tower_Defense

пост. 24.04.2017

Е.Н. СИГАРЕВ, д.т.н., профессор**А.Н. СОКОЛ**, к.т.н., доцент**Н.Н. НЕДБАЙЛО**, аспирант

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

Компьютерное моделирование теплового состояния системы «гарнисаж - футеровка» с учётом неравномерности её толщины

Целью работы являлось исследование тепловых процессов, протекающих в системе «шлаковый гарнисаж - футеровка» кислородного конвертера по ходу кампании агрегата с учётом динамики формирования гарнисажного слоя и неравномерности его толщины по высоте рабочего пространства. Предложена математическая модель и разработано соответствующее программное обеспечение. В ходе серии вычислительных экспериментов получены зависимости, в целом, соответствующие производственным данным.

Постановка проблемы

Разработка экономически обоснованных и совершенствований способов дальнейшего повышения стойкости периклазоуглеродистой футеровки кислородных конвертеров, в том числе с применением технологии раздувки конечного шлака на футеровку, предполагает учет тепловых условий работы системы «шлаковый гарнисаж — футеровка». Замедление скорости стекания нанесенной на огнеупор шлаковой пленки, ее кристаллизация и формирование гарнисажного слоя достаточной толщины определяются, в основном, градиентом температур на границах гарнисаж-огнеупор и огнеупор-кожух агрегата.

Анализ последних исследований и публикаций

В последние десятилетия конвертерное производство стали в Украине и за рубежом характеризуется значительным повышением стойкости футеровки агрегатов при снижении затрат на огнеупоры [1, 2]. К основным факторам, обеспечивающим увеличение стойкости футеровки, относят улучшение качественных показателей огнеупорных изделий, применение специальных магнезиальных флюсов для модифицирования конечного шлака, повышение эффективности нанесения шлакового гарнисажа за счет совершенствования прие-

мов и конструкции фурм, применение дополнительного охлаждения в проблемных зонах.

С учетом сложности организации и проведения прямых экспериментальных исследований высокотемпературных процессов целесообразно применение комбинированных методов физического низкотемпературного моделирования динамики нанесения гарнисажного слоя [2, 3], усиленного численными исследованиями теплового состояния шлакового гарнисажа и футеровки. Ранее, авторами работ [4, 5] исследованы особенности гидрогазодинамики потоков в рабочем пространстве конвертера при раздувке шлаковой ванны, в работах [6, 7] предложены варианты описания теплового состояния футеровки и шлакового гарнисажа.

Как известно [2, 3, 7], процесс раздувки конечного конвертерного шлака с целью нанесения шлакового гарнисажа на футеровку включает этапы:

- формирования многоструйного азотного потока с направлением струй, истекающих из сопел Лаваля продувочной или специальной гарнисажной фурмы [3], под углом к поверхности шлаковой ванны;

- взаимодействия струй со шлаковым расплавом с образованием реакционных зон, из пределов которых происходит брызговынос потока шлаковых капель преимущественно на стены, а также, в меньшей степени, на ствол фурмы и через горловину агрегата (рис. 1);

- теплопередачи от кристаллизующегося шлакового расплава к рабочему слою огнеупора и через растущий гарнисажный слой и футеровку к кожуху.

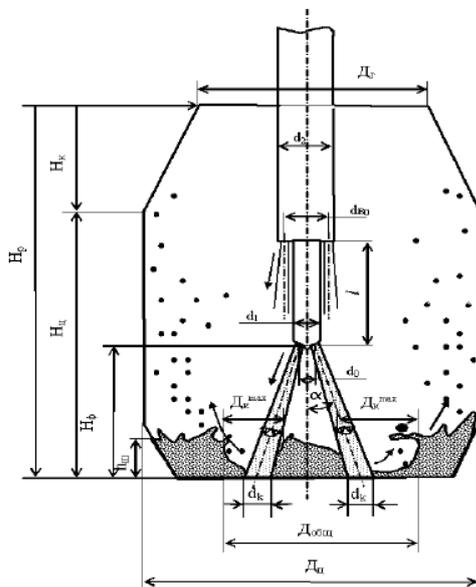


Рис. 1. Схема раздувки шлака и нанесения гарнисажа с использованием специальной фурмы [3]

Формулировка цели исследования

Целью работы является численное исследование теплового состояния системы «гарнисаж — футеровка» кислородного конвертера с учетом неравномерности её толщины и динамики формирования шлакового гарнисажа.

Изложение основного материала

Во время проведения горячего ремонта футеровки конвертера методом раздувки конечного подготовленного шлака нанесенный гарнисаж распределяется по высоте конвертера существенно неравномерно, что подтверждается как численными исследованиями, так и сканограммами рабочего пространства промышленных конвертеров. В качестве базовой математической модели использовали модель, представленную в работе [8] и получившую развитие в [9].

Тепловую сторону процесса нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера предлагается описывать следующим уравнением:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{\nabla}(T\vec{V}) + \frac{\lambda'_e}{C\rho} \Delta T, \quad (1)$$

где T — температура среды в целом; t — время процесса; \vec{V} — скорость среды в целом; λ'_e — эффективная теплопроводность среды в целом, учитывающая турбулентные эффекты; теплопроводность футеровки (в зоне футеровки); C — теплоёмкость дисперсной фазы; теплоёмкость футеровки (в зоне футеровки); $\rho = \rho^0 \alpha$ — плотность среды в целом, равная произведению истинной плотности дисперсной фазы (шлака) на его объёмную концентрацию; плотность футеровки (в зоне футеровки).

Уравнение (1) дополняется следующими граничными условиями:

- на внешней по радиусу границе факела, образованного потоком газа, отраженного от днища конвертера, и захваченными каплями шлака, задана фиксированная температура;

- на верхней границе факела, примыкающей к оси симметрии конвертера, задано условие теплоизоляции;

- на границе «футеровка — окружающая среда» задаётся величина отводимого теплового потока, причём эта величина неравномерна по высоте конвертера (таким образом моделируется локальное охлаждение кожуха конвертера, организованное распылением технической воды с помощью системы форсунок).

Уравнение (1) решалось методом конечных разностей на равномерной шахматной сетке в цилиндрических координатах.

В численных экспериментах значения основных геометрических характеристик задачи выбраны в соответствии с таблицей 1. На рисунке 2 представлены результаты численного моделирования гидрогазодинамики в рабочем пространстве конвертера, а также распределение поля температур в рабочем пространстве конвертера, в гарнисажном слое и в слое футеровки. Результаты соответствуют значениям толщины футеровки а) — 1000 мм., б) — 800 мм., в) — 600 мм.; г) — 400 мм., д) — 200 мм. При больших значениях толщины футеровки (1000 мм.—600 мм.) температура вблизи кожуха конвертера остаётся неизменной — сказываются теплоизолирующие свойства футеровки, обусловленные её низкой теплопроводностью.

Таблица 1. Геометрические характеристики задачи

Параметр	Значение
Высота конвертера	7,2 м.
Радиус конвертера	2,8 м.
Толщина слоя футеровки	0,2 м.
	0,4 м.
	0,6 м.
	0,8 м.
Количество ячеек в разбиении расчётной области	10×20
	10×50

При уменьшении толщины футеровки до 400 мм. и 200 мм. теплоотвод в окружающую среду увеличивается, температура футеровки, примыкающей к кожуху конвертера, повышается; температура нанесенного шлакового слоя в зоне контакта с футеровкой при этом уменьшается, чем обеспечиваются условия для кристаллизации шлака и формирования гарнисажа.

Таким образом, можно сделать вывод, что влияние локального охлаждения кожуха конвертера (и целесообразности применения средств принудительного теплоотвода) с уменьшением толщины футеровки усиливается.

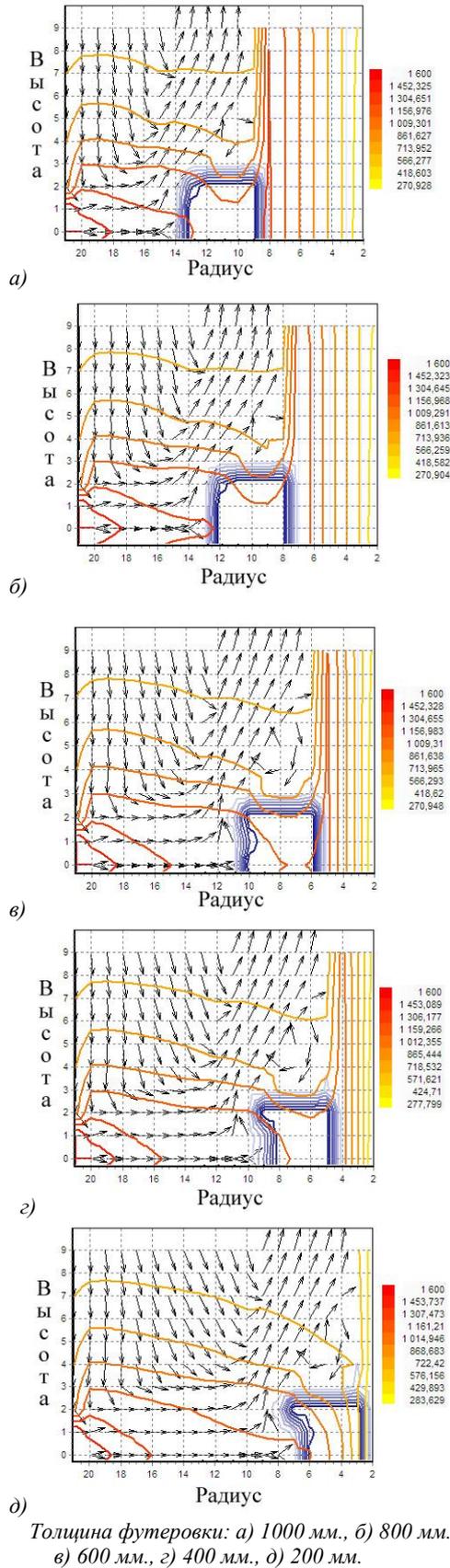


Рис. 2. Поле температур в рабочем пространстве конвертера, гарнисажном слое и футеровке

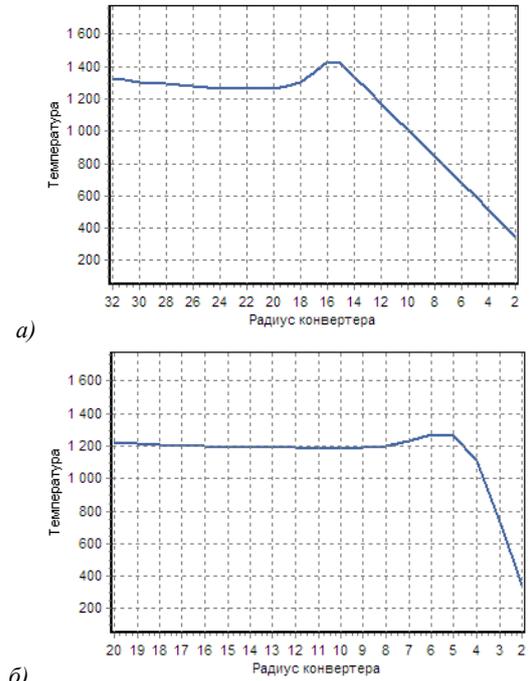


Рис. 3. Температура гарнисажного слоя и футеровки на разном расстоянии до кожуха агрегата

На рисунке 3 представлены графики зависимости температуры гарнисажного шлакового слоя и футеровки конвертера в зависимости от расстояния до кожуха агрегата для значений толщины футеровки а) — 800 мм и б) — 200 мм. Как видно (рис. 3), температура гарнисажного слоя существенно снижается при уменьшении толщины футеровки, что объясняется ослаблением теплоизолирующих свойств футеровки по мере уменьшения её толщины. Установленная зависимость позволяет сделать вывод, что при небольших толщинах футеровки (менее 400 мм для изученных условий) теплоотвод в сторону окружающей среды увеличивается и обеспечивается локальное формирование гарнисажного слоя большей толщины. Это соответствует результатам моделирования [9] и сканограмме рабочего пространства конвертера, представленной на рисунке 4. В левой части конвертера, в районе цапфенных зон, футеровка до операции ошлакования практически полностью изношена в сравнении с футеровкой в правой части. При этом после операции ошлакования раздувкой шлаковой ванны толщина сформированного гарнисажного слоя в левой части существенно больше, чем в правой части.

Зависимости, приведенные на рисунке 3, хорошо согласуются с результатами, полученными в работе [7].

Выводы и перспективы дальнейших исследований

В результате проведенного численного моделирования теплового состояния системы «гарнисаж — футеровка» кислородного конвертера при изменении её толщины с учётом динамики формирования слоя шлакового гарнисажа и неравномерности его толщины по высоте агрегата подтверждены предположения об эффективности организации локального охлаждения (со

стороны кожуха конвертера). Целесообразность охлаждения проблемных зон, в которых футеровка существенно изношена (менее 400 мм для условий моделирования), обусловлена установленным увеличением теплоотвода от кожуха агрегата при ослаблении теплоизолирующего влияния футеровки.

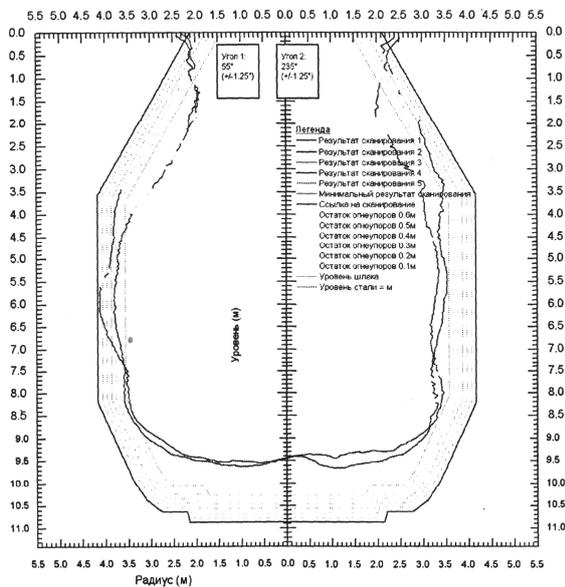


Рис. 4. Сканограмма рабочего пространства конвертера до и после операции ошлакования

ЛИТЕРАТУРА

1. Современная футеровка для крупных кислородных конвертеров / А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин, А.Н. Смирнов // *Металл и литье Украины*. – 2010. – № 9–10. – С. 4–7.
2. Моделирование элементов процесса нанесения гарнисажного покрытия на рабочий слой футеровки конвертера / А.Н. Смирнов, К.Н. Шарандин,

3. Особенности гидрогазодинамики раздувки шлаковой ванны двухъярусной фурмой / Е.Н. Сигарев, А.Г. Чернятевич, Н.Н. Недбайло // *Збірник наукових праць Дніпродзержинського технічного університету: (технічні науки)* – Дніпродзержинськ: ДДТУ. – Вип. 3(23). – 2013. – С. 13–21.
4. Гидрогазодинамические закономерности нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера / А.Г. Чернятевич, Е.Н. Сигарев, Е.А. Чубина // *Металлы и литье Украины*. – 2005. – № 3–4. – С. 45–47.
5. Математична модель гідродинаміки процесу продувки шлакової ванни у порожнині конвертера / А.Г. Чернятевич, О.С. Самохвалов, Є.М. Сігарьов, О.А. Чубіна // *Математичне моделювання*. – 2005. – №1(13) – С. 76–78.
6. Процессы теплообмена в условиях нанесения шлакового гарнисажа и факельного торкретирования футеровки конвертеров. Математическая модель / Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич, В.В. Соколов, О.С. Самохвалов, Е.А. Чубина // *Известия ВУЗов : Черная металлургия*. – 2004. – №10. – С. 8–13.
7. Динамика теплового состояния футеровки и шлакового гарнисажа при раздувке конечного шлака в кислородном конвертере / Р.В. Лисняк, И.С. Долгополов, Е.Н. Сигарев, Е.С. Косухина, В.Т. Тучин // *Технічна теплофізика та промислового теплоенергетика: збірник наукових праць*. – Випуск 4. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2012. – С. 156–165.
8. Моделювання нанесення шлакового гарнісажу з метою оптимізації процесів гарячого ремонту футерівки конвертера / Сігарьов Є.М., Чернятевич А.Г., Сокол А.М. // *Математичне моделювання*, 2011. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, № 2(25). – С. 116–119.
9. Компьютерное моделирование нанесения шлакового гарнисажа на футеровку конвертера при изменении положения фурмы / Е.Н. Сигарёв, А.Н. Сокол, Н.Н. Недбайло // *Математичне моделювання*, 2015. – Дніпродзержинськ : ДДТУ, № 1(32). – С. 56–59.

пост. 27.04.2017

А.Ю. Лизун // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. – №11, 2012. – С. 43–48