

УДК 669.27

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА «ПроДСП-1.0» ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ В ДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Докт. физ.-мат. наук, проф. ЧИЧКО А. Н., докт. техн. наук, проф. СОБОЛЕВ В. Ф.,  
канд. техн. наук ЛИХОУЗОВ С. Г., асп. ЧИЧКО А. А.

*Белорусский национальный технический университет*

Проблема снижения энергозатрат при ведении процесса плавки – одна из важнейших в сталеплавильном производстве. Опыт работы сталеплавильного цеха РУП «БМЗ» показывает, что одним из эффективных инструментов, повышающих качество плавки и снижающих энергетические затраты на нее, является оптимизация шлаковых режимов ДСП. В [1, 2] предложена динамическая модель процесса шлакообразования, основное назначение которой – динамический расчет фосфора в процессе плавки при условии введения различных компонентов. Динамический расчет фосфора во времени основывается на термодинамических полуэмпирических моделях, учитывающих взаимодействие компонентов шлаковой ванны в печи при заданной температуре [3]. Полуэмпирический характер модели позволяет привязать ее к любой ДСП и тем самым конкретизировать возможные варианты и рекомендации по оптимизации шлакового режима.

Цель данной работы – разработка программного обеспечения «ПроДСП-1.0», ядро которой составляют полуэмпирическая динамическая модель шлакообразования и экспериментальная апробация на основе анализа влияния входных параметров процесса плавки на динамику изменения фосфора в печи ДСП.

На первом этапе были получены экспериментальные данные по распределению фосфора и шлаковому режиму 20 плавок, выполненных на ДСП № 1 и 2 РУП «БМЗ». Рассчитанные с помощью «ПроДСП-1.0» функции распределения фосфора во времени показали хорошую сходимость расчетных и экспериментальных данных.

На рис. 1 представлен один из вариантов работы с программой «ПроДСП-1.0», в котором в качестве исходных параметров выступали следующие данные:

- содержание фосфора в металле по расплавлению (оперативный режим) либо его содержание в шихтовых материалах по результатам входного контроля;

- масса металлошихты завалки;
- масса извести в завалке;
- масса и состав болота, оставленного от предыдущей плавки.

В качестве выходных данных рассчитывались концентрация фосфора в металле и степень его дефосфорации при различных условиях шлакового режима плавки.

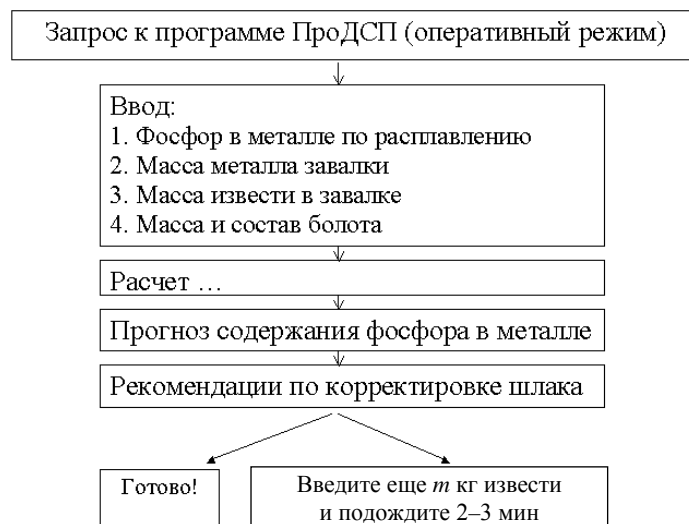


Рис. 1. Структура запроса и выходных данных к компьютерной системе «ПроДСП» (оперативный вариант)

На рис. 2 предлагается схема работы с программным обеспечением «ПроДСП-1.0». Система может работать в двух режимах. Первый режим предполагает оперативное вмешательство в процессе плавки. Второй режим может использоваться для расчета планируемых технологических схем процесса плавки. При использовании первого режима система на основании термодинамических расчетов вычисляет текущее распределение фосфора и изменение его концентрации в металле по ходу плавки по заданному режиму. В случае, если конечное содержание фосфора находится в допустимых пределах, плавка продолжается без изменений. Если же конечное содержание фосфора может превысить допустимое по отношению к требованиям, предъявляемым к конечному продукту, система рассчитывает необходимое количество извести, добавляемой в ванну для предотвращения рефосфорации.

Во втором режиме система прогнозирует возможный уровень фосфора в стали при выплавках на различной шихте в зависимости от:

- начального содержания фосфора в металлошихте;
- расходов извести в завалку;
- количества обновляемого шлака;
- остаточной массы шлака болота и его состава;
- выбранной технологии плавки.

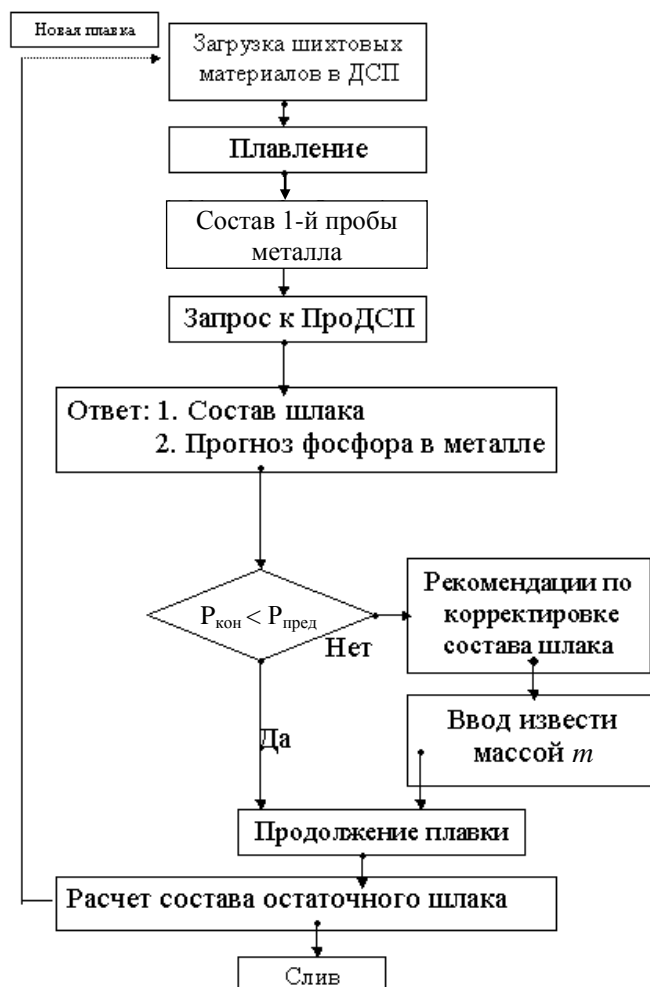


Рис. 2. Схема работы компьютерной системы «ПроДСП-1.0» в технологической цепочке РУП «БМЗ» (оперативный вариант)

Таким образом, система позволяет проверить любые варианты по изменению текущей технологии выплавки без нарушения текущего процесса.

В качестве примеров использования системы «ПроДСП-1.0» приведены результаты расчетов влияния различных факторов на дефосфорацию металла в ДСП.

**Расчет стадии расплавления металла.** В качестве модельных параметров для моделирования были выбраны следующие условия:

- температура расплавления металла – 1512 °С;
- расход извести в завалку – 1000–10000 кг;
- расход доломита в завалку – 200 кг.

На основании предыдущих исследований масса металла болота была задана 10 т, масса шлака болота – 5 т. Изменение массы болота варьировалось от 3 до 8 т.

**Расчет периода окислительного рафинирования.** В отличие от периода расплавления период окислительного рафинирования становится возможным при проведении ряда мероприятий, влияющих на процесс дефосфорации в ДСП. Особенностью моделирования данного периода явля-

ется наличие в качестве исходных данных динамических параметров плавки. В частности, шлаковый режим плавки задавался указанием скорости нагрева ванны, массы вводимой извести и времени ее отдачи, а также времени и массы слива шлака.

**Влияние обновления шлака.** На рис. 3 представлено моделирование изменения концентрации фосфора в металле по мере протекания периода окислительного рафинирования при обновлении и без обновления шлака. Видно, что при отсутствии обновления шлака по мере нагрева ванны будет происходить рефосфорация, т. е. концентрация фосфора в металле начнет плавно повышаться (пунктирная кривая 2, рис. 3). Обновление шлака путем его слива и ввода свежих порций извести способствует частичному или полному предотвращению его перехода в металл (непрерывная кривая 1, рис. 3). Таким образом, период окислительного рафинирования играет стабилизационную роль – основная масса фосфора удаляется при расплавлении металла, основной же задачей данного периода является максимально возможное снижение степени рефосфорации металла. При этом было установлено, что для стабилизации фосфора в металле по мере повышения его температуры требуются все возрастающие порции извести.

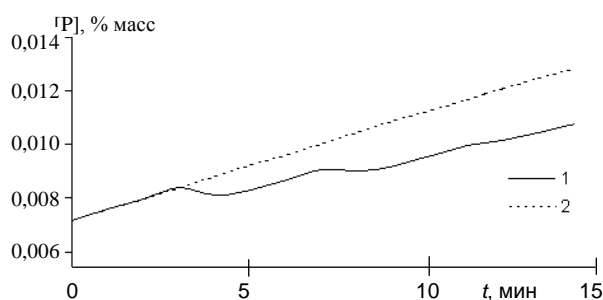


Рис. 3. Изменение концентрации фосфора в металле по мере протекания периода окислительного рафинирования: 1 – при обновлении; 2 – без обновления шлака; масса шлака болота – 5 т; масса извести в завалке – 4 т; обновление проводилось последовательными присадками порций извести 350, 200 и 150 кг со скачиванием в течение 1 мин эквивалентной массы шлака

**Влияние момента слива первичного шлака.** Существуют два возможных способа обновления шлака: добавка порции извести с его частичным сливом (до или после введения присадки) и без слива. Первый способ является рациональным, так как вместе со сливаемым шлаком из системы удаляется фосфор, в то время как при присадке извести и отсутствии слива шлака удаления фосфора из системы «металл – шлак» происходить не будет, возможным станет только его перераспределение между фазами вследствие изменения их химического состава и температуры. В то же время по первому способу моменты слива шлака и присадки извести могут быть разнесены во временном интервале плавки. В ходе работы моделировалось снижение концентрации фосфора в металле при обновлении шлака со скачиванием его части в течение 1 мин после присадки извести и непосредственно перед сливом плавки. Результаты показали, что при задержке

момента скачивания шлака происходит дополнительное повышение содержания фосфора в металле. Вместе с тем минимальное время, прошедшее от момента присадки извести до слива шлака, должно соответствовать времени реагирования извести, составляющего 3–4 мин по результатам исследований, выполненных в 2005–2006 гг. на РУП «БМЗ». При вдувании тонко измельченной извести вследствие ускорения реакции указанный интервал может снижаться до 1–2 мин и связан с ее оптимальным растворением.

**Эффективность использования извести в период окислительного рафинирования.** Под эффективностью использования извести будем понимать количество фосфора, удаляемое из металла в расчете на единицу массы вводимой извести. Начальной задачей было определение эффективности использования добавок извести и обновления шлака в различные стадии периода окислительного рафинирования. В ходе моделирования установлено, что количество фосфора, удаляемое из металла в расчете на 1 кг вводимой извести, зависит от времени ее ввода. Количество удаляемого из металла фосфора линейно уменьшается при смещении времени ее ввода к концу периода окислительного рафинирования. Из этого также следует целесообразность использования больших количеств извести ближе к началу плавки, когда температура металла является невысокой и условия благоприятствуют протеканию дефосфорации. По мере повышения температуры металла условия рафинирования от фосфора непрерывно ухудшаются, что проявляется в увеличении необходимой массы извести для равного снижения содержания фосфора в металле. Наилучшее время для использования извести в целях дефосфорации – период расплавления. Ограничением на максимально допустимое количество извести здесь является требование жидкоподвижности шлака при низких температурах начала плавления металла. Для выполнения этого требования содержание извести не должно превышать пределы ее растворимости при температурах 1400–1500 °С. В противном случае вследствие образования гетерогенного шлака эффективность ряда процессов в ДСП, в том числе и дефосфорации, резко снизится из-за кинетических факторов.

На следующем этапе была исследована эффективность использования равных масс извести в зависимости от режима ее ввода, в частности от разбиения общей массы на равные порции. Интересным фактом было то, что дробление добавки на порции способствует большему снижению содержания фосфора в системе. Вместе с тем масштаб данного эффекта незначителен и при увеличении числа порций быстро начинает нивелироваться растущей температурой металла. Так, при увеличении числа порций до пяти результат дробления извести оказывается ниже, чем для трехкратного дробления порции. При уменьшении же времени обработки эффект дробления не будет ощущаться. Так как время установления равновесия реакции дефосфорации в печи составляет 3–4 мин, использовать эффект дробления имеет смысл только при вдувании тонкоизмельченной извести. Следует отметить, что масштаб эффекта дробления существенно возрастает при увеличении степени обновления шлака.

Таблица 1

Исходные данные для моделирования влияния начального содержания фосфора на ход дефосфорации

Вариант	Начальное содержание Р в металлошихте, %	Масса обновляемого шлака, кг
1	0,006	3000
2	0,0107	3000
3	0,02	3000
4	0,006	0
5	0,0107	0
6	0,02	0

**Начальное содержание фосфора.** Для количественной оценки влияния начального содержания фосфора на ход дефосфорации были рассчитаны режимы плавки стали для следующих вариантов (табл. 1).

Результаты моделирования представлены на рис. 4. Из данного рисунка видно, что для всех плавок наблюдается почти прямая пропорциональность между начальными и конечными концентрациями фосфора.

Вместе с тем следует отметить, что ход температурной зависимости различается: для плавок с более высоким содержанием фосфора – прямая имеет больший наклон, что обусловлено более высокой концентрацией фосфора в шлаке.

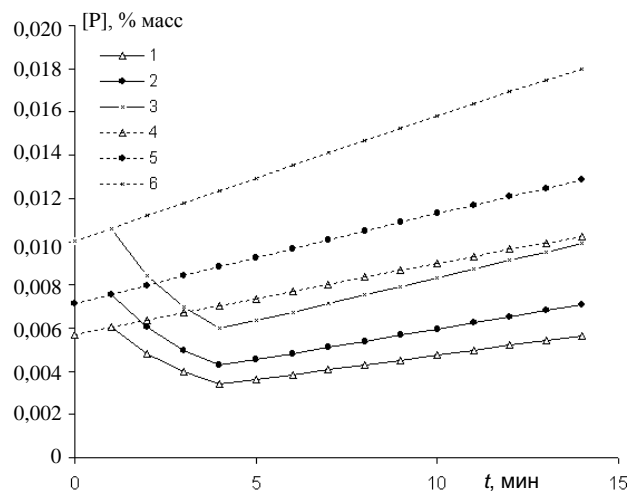


Рис. 4. Изменение концентрации фосфора в металле по мере протекания окислительного периода плавки в зависимости от начального содержания фосфора в металлошихте по результатам моделирования. Цифры соответствуют номерам вариантов исходных данных в табл. 2

Таким образом, при выплавке стали из шихты с ростом содержания фосфора повышаются требования к соблюдению температурного режима. Такие плавки более чувствительны к рефосфорации в результате перегрева.

**Масса шлака болота.** Моделирование влияния массы болота на удаление фосфора проводилось для среднего содержания фосфора в металлошихте 0,0107 % при наличии и отсутствии обновления шлака массой 3000 кг. Масса добавляемой в завалку извести составляла 4000 кг. Варианты исходных данных моделирования плавки указаны в табл. 2.

Таблица 2

**Исходные данные для моделирования  
влияния массы болота шлака  
на ход дефосфорации**

Вариант	Начальное содержание Р в металлошихте, %	Масса обновляемого шлака, кг
1	2500	3000
2	5000	3000
3	7500	3000
4	2500	0
5	5000	0
6	7500	0

В результате моделирования продемонстрировано отрицательное влияние большой массы шлака болота на ход процесса дефосфорации. Его негативное влияние проявляется не только в том, что значительная масса болота служит основным источником фосфора для последующей плавки и препятствует ее успешной дефосфорации, но и в том, что аналогично началь-

ному уровню фосфора в шихте большая масса шлака болота увеличивает температурную чувствительность плавки к рефосфорации.

Таким образом, можно заключить, что влияние массы болота и начального содержания фосфора в металлошихте имеет схожую природу и выражается как в повышении содержания фосфора в металле в процессе окислительного рафинирования, так и в увеличении температурной чувствительности плавки к рефосфорации.

**Влияние массы извести в завалке.** На рис. 5 представлены результаты моделирования влияния массы извести в завалке плавки на степень дефосфорации металла. Как видно из представленного рисунка, по мере повышения расхода извести в завалке кривые степени дефосфорации асимптотически приближаются к 100 %. Видно также, что большие массы вводимой в завалку извести оказывают нивелирующий эффект на степень дефосфорации. Тем не менее представленные данные показывают, что чрезмерное использование извести является достаточно затратным, так как ее дефосфорирующий эффект постепенно снижается с ростом ее количества.

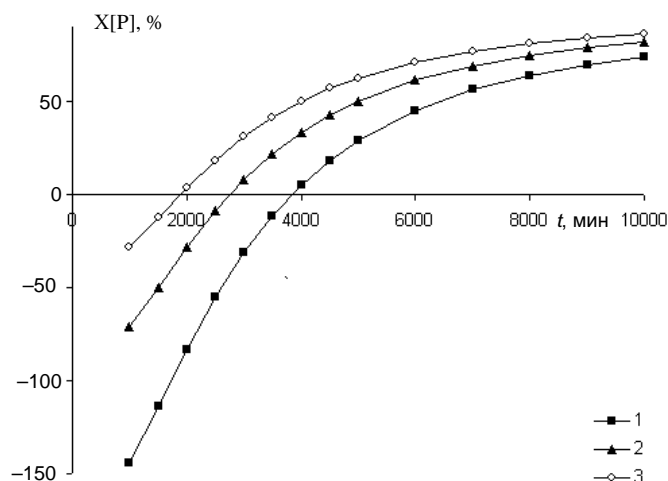


Рис. 5. Влияние массы извести в завалке плавки на степень дефосфорации металла при массе шлака болота 5000 кг. Цифрами на рисунке обозначены средние содержания фосфора в металлошихте: 1 – 0,006; 2 – 0,0107; 3 – 0,02 %

Таким образом, целесообразным является точный расчет минимально необходимого количества извести в зависимости от требуемого содержания фосфора в конечном продукте. Разработанное программное обеспечение «ПроДСП-1.0» позволяет прогнозировать динамику процесса дефосфорации при течении плавки и на основе экспериментальных данных предложить оптимальные режимы плавки в дуговых печах РУП «БМЗ». Используя входные данные технологического процесса, продемонстрированы возможности расчетов содержания фосфора в металле в зависимости от следующих факторов: степени обновления шлака, времени и температуры слива первичного шлака, массы извести в завалке, масса шлака болота, а также начального содержания фосфора в металлошихте.

## ВЫВОДЫ

На основе моделирования периодов плавления и окислительного рафинирования с использованием «ПроДСП-1.0» были установлены следующие закономерности:

- наиболее эффективно удаление фосфора осуществляется при вводе извести в возможно ранний период протекания плавки, соответствующий оптимальному протеканию дефосфорации металла;
- обновление шлака является одним из сильнейших факторов, влияющих на конечное содержание фосфора в металле;
- удаление фосфора незначительно повышается при дроблении добавки извести на эквивалентные порции, причем выраженность данного эффекта возрастает при увеличении степени обновления шлака;
- влияние массы болота и начального содержания фосфора в металлошихте имеет схожую природу и выражается как в повышении содержания фосфора в металле в процессе окислительного рафинирования, так и в увеличении температурной чувствительности плавки к рефосфорации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Д и н а м и к а распределения фосфора по ходу окислительного рафинирования в условиях дуговой сталеплавильной печи / А. Н. Чичко [и др.] // Сталь. – 2006. – № 6. – С. 62–65.
2. О б а л г о р и т м и з а ц и и расчетов состава шлака дуговой сталеплавильной печи / А. А. Чичко [и др.] // Литье и металлургия. – 2006. – Т. 39, № 3. – С. 130–136.
3. И с п о л ь з о в а н и е термодинамической активности для оптимизации энергозатрат по процессу плавки в дуговой сталеплавильной печи / А. Н. Чичко [и др.] // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2006. – № 5. – С. 56–62.

Представлена кафедрой  
машин и технологии  
литейного производства

Поступила 5.05.2007