

УДК: 669.1.046.554:669.15-198:519.87

*В.Д. ТУТАРОВА*, канд. техн. наук, доц. ФГБОУ ВПО  
Магнитогорский государственный технический университет,  
Магнитогорск, Россия

*Ю.В. СНЕГИРЕВ*, аспирант, ФГБОУ ВПО Магнитогорский  
государственный технический университет, Магнитогорск, Россия

## **СРАВНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАСТВОРЕНИЯ РЕАГЕНТОВ В ЖИДКОЙ СТАЛИ**

В статье анализируются математические модели растворения реагентов в жидкой стали при внепечной обработке. Сравнение моделей производится по следующим критериям: исходным данным, по температуре плавления реагентов, условиям окончания процесса расплавления, геометрическим параметрам вводимых реагентов. Для систематизации сведения о моделях представлены в виде ментальных карт. Ил.: 3. Библиогр.: 14 назв.

**Ключевые слова:** математическая модель, расплавление, реагент, внепечная обработка стали, критерии, ментальная карта.

**Постановка проблемы и анализ литературы.** На данном этапе развития науки и техники математическое моделирование находит всё более широкое применение во всех отраслях науки и техники. Исключением не стала и металлургия. В этой области активно эксплуатируются математические модели, охватывающие не только стратегии управления производством и целыми предприятиями, но и отдельные технологические процессы и даже конкретные их аспекты.

Металлургическое производство состоит из множества переделов. В работе рассматривается один из сталеплавильных переделов, а именно – внепечная обработка.

Ввод твердых реагентов в жидкий расплав – один из видов внепечной обработки. Реагенты могут поставляться в виде проволоки, порошковой проволоки и кусков различной фракции. В зависимости от температуры плавления различаются также механизмы их расплавления. При получении высококачественной стали этими факторами нельзя пренебрегать.

Однако экспериментальные исследования механизмов расплавления реагентов в условиях действующего производства весьма затруднены в связи с высокой стоимостью и большими затратами человеческих ресурсов. "Холодные" модели могут быть недостаточно приближены к действительности, поэтому одним из возможных достоверных средств

исследования данных процессов остаётся математическое моделирование.

В отличие от этапов выплавки и непрерывной разливки стали [1 – 8] вопросам и проблемам внепечной обработки уделено незначительное количество работ. В частности, математическое моделирование процесса расплавления реагентов в жидком металле рассмотрено в работах А.Ю. Никулина [9], коллектива авторов в составе В.И. Жучкова, А.С. Носкова и А.Л. Завьялова [10], Д.Х. Девятова [11], коллектива авторов в составе М. Radune, A. Radune, F. Assous\*, M. Zinigrad [12], а также Y.C. Rodriguez, G.G. Muzquiz, J.R.P. Torres, L.E.R. Vidaurri [13].

**Цель статьи** – анализ математических моделей расплавления реагентов в жидком металле при внепечной обработке для выявления их достоинств и недостатков.

Для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач:

- группировка моделей согласно решаемой задаче;
- выделение критериев сравнения математических моделей растворения реагентов в жидком металле при внепечной обработке;
- сравнение существующих моделей согласно выделенным критериям;
- выявление достоинств и недостатков существующих моделей.

**Критерии сравнения математических моделей.** При анализе математических моделей, изложенных в работах [9 – 13], было выявлено, что описанные модели обладают различной степенью детализации, однако в них прослеживаются как общие черты, так и существенные различия. Рассматриваемые модели можно классифицировать в зависимости от решаемой задачи на две группы. В основе моделей, описанных в [9 – 11], лежит решение уравнения теплопроводности, тогда как в моделях [12, 13] – расчет концентрации химического элемента. Предварительный анализ описаний математических моделей показал, что выделение четких критериев необходимо не только для их сравнения, но и для реализации программных продуктов на их основе.

Были выделены следующие критерии сравнения моделей [9 – 11]:

- исходные данные: начальные, граничные условия и т.д.
- классификация реагентов по температуре плавления;
- условия окончания расплавления реагента;
- предлагаемая схема решения дифференциальных уравнений теплопроводности;

– учёт дополнительных факторов, например, конвективного теплообмена, потерь тепла через футеровку ковша и за счёт излучения с поверхности;

– применимость: геометрическая форма реагента (проволока, шар, цилиндр), момент присадки и др.

Ввиду обширности критериев сравнения для описания моделей было принято решение о применении ментальных карт одинаковой структуры. Данное представление обладает повышенной наглядностью и удобством чтения и должной полнотой описания [14].

**Модель А.Ю. Никулина.** Ментальная карта модели представлена на рис. 1. Поясним некоторые компоненты ментальных карт. Началом каждой из карт является название модели с указанием её автора. Ветвь "Учет факторов" показывает, какие факторы, не касающиеся расплавления реагентов непосредственно, учитываются в модели (например, влияние скорости погружения на тепловой поток через границу реагент-расплав, потери тепла расплава через футеровку и т.д.).

Ветвь "Охват" обозначает, насколько полно в модели рассмотрены потомки этой ветви. К примеру, принимается ли во внимание тепловое состояние ковша в целом, или присутствует ли в модели классификация реагентов по температуре плавления.

Ветвь "Виды реагентов" показывает, для какой геометрической формы реагентов применима модель. Например, для круглой формы реагента, или для реагентов в форме бесконечного цилиндра (проволоки).

Рассматриваемая модель обладает крайне широким охватом. В ней присутствует более подробная классификация реагентов по температуре плавления, чем в других рассматриваемых моделях. Также нельзя не отметить подробную проработку схем растворения всех видов рассматриваемых реагентов. Описаны все шаги алгоритма по расчету согласно предлагаемой схемы решения дифференциальных уравнений теплопроводности – явной, с методом растягивающихся сеток. Однако, выбор явной схемы не совсем удачен, т.к. при программной реализации данной модели с расчетами по предлагаемой схеме может проявиться её неустойчивость. Наконец, в данной модели учитывается зависимость коэффициента теплоотдачи от характера погружения реагента в жидкую сталь, влияние на теплофизические параметры вынужденной и естественной конвекции.

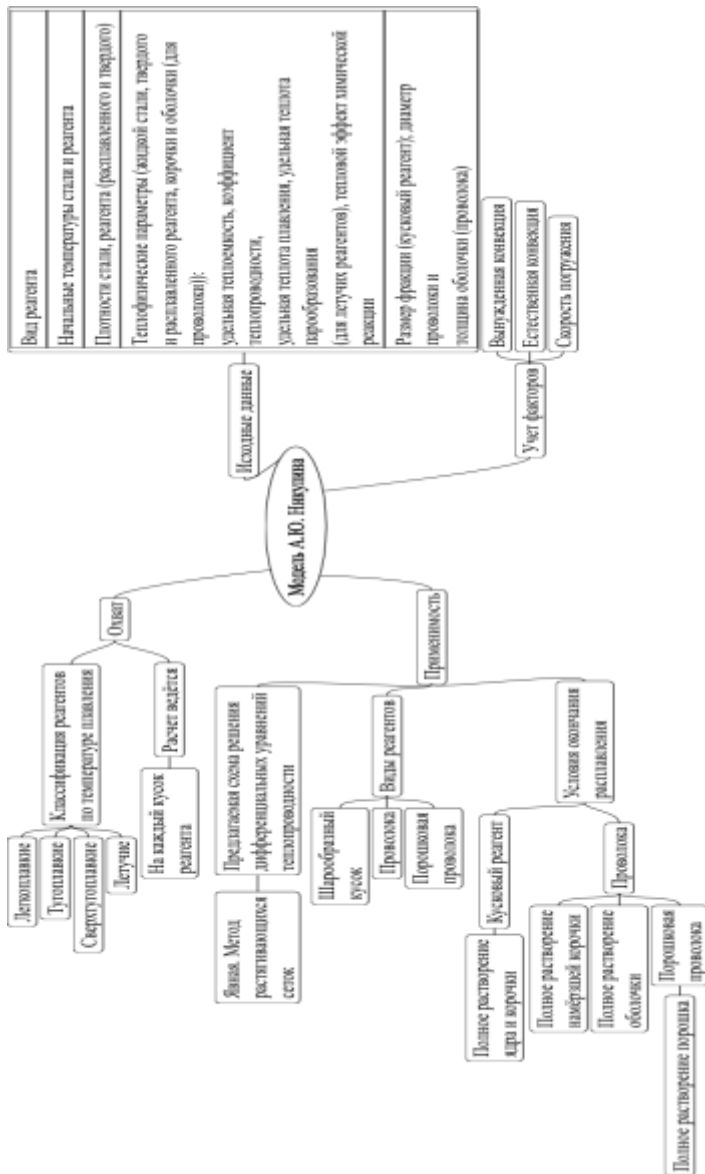


Рис. 1. Ментальная карта математической модели А.Ю. Никулина

В целом, следует заметить, что данная модель отличается большой тщательностью проработки и претендует на всеохватывающую полную описания растворения реагентов в жидкой стали. Её применение возможно как для описания характера расплавления реагентов при выпуске стали из плавильного агрегата (реагенты помещаются в сталеразливочный ковш перед и во время выпуска), так и при присадке во время внепечной обработки на других агрегатах.

**Модель В.И. Жучкова, А.С. Носкова и А.Л. Завьялова.**  
 Ментальная карта данной модели представлена на рис. 2.

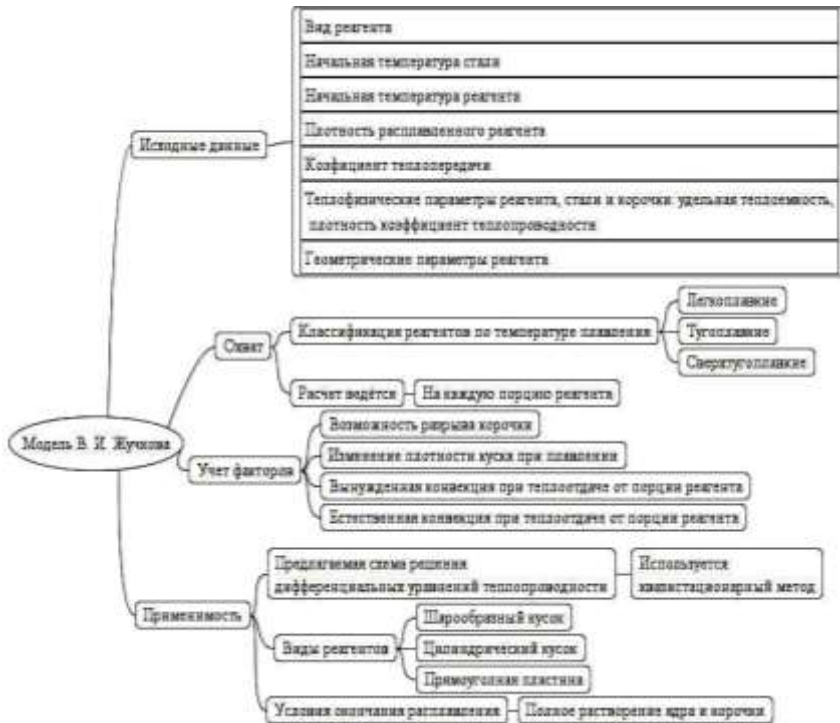


Рис. 2. Ментальная карта математической модели В.И. Жучкова

Согласно представленной ментальной карте следует, что данная модель во многом сходна с предыдущей. Такие параметры, как исходные данные, классификация реагентов по температуре плавления, учет влияния вынужденной и естественной конвекции на теплофизические

параметры вводимого реагента, а также то, как ведётся расчёт – на каждый кусок введенного реагента – в данной модели являются подмножествами предыдущей.

Однако присутствуют и явные различия:

1) формы вводимого реагента (шар, бесконечный цилиндр (проволока) и плоская пластина);

2) в данную модель заложен учёт изменения плотности реагента по мере изменения температуры;

3) для некоторых легкоплавких реагентов авторы предполагают возможность разрушения корочки намерзшего расплава на первоначальном этапе растворения. Однако величина разрушения корочки не учитывается.

Следует заметить, что при описании методики расчета авторы утверждают, что как изменением плотности реагента, так и разрушением корочки можно пренебречь. Это подтверждается экспериментальными данными.

В данной модели описание методики расчета не столь подробно, как в предыдущей. Также отличается и предлагаемый авторами способ решения дифференциальных уравнений теплопроводности: т.к. для инженерных задач наиболее важной характеристикой является время расплавления добавки, то для решения дифференциальных уравнений теплопроводности предлагается использовать квазистационарный метод.

**Модель Д.Х. Девятова.** Ментальная карта данной модели представлена на рис. 3.

Данная модель в корне отличается от предыдущих, так как при расчете расплавления реагентов учитываются макропараметры всей ванны, а не только некоторой окрестности расплава. Несмотря на то, что в данной модели реагент и его окружение рассматривается как система шаров, концентрически вложенных друг в друга, компоненты этой системы несколько отличаются от предлагаемых в рассматриваемых ранее работах. Внешний шар представляет собой футеровку сталеразливочного ковша, внутренний – реагент. Между ними расположен шар, представляющий расплав. Одним из допущений модели является то, что перенос тепла здесь учитываются только за счет теплопроводности. Однако, здесь также учтены потери тепла расплавом через футеровку за счет теплоотдачи и излучением с поверхности расплава (при отсутствии теплоизолирующей крышки сталеразливочного ковша).



Рис. 3. Ментальная карта математической модели Д.Х. Девятова

К сожалению, в модели недостаточно подробно описан механизм плавления самого куска ферросплава. Можно заключить, что он схож с механизмом, предлагаемым авторами в [10]. Также, в данной модели отсутствует подробное, в отличие от модели [9], описание схемы решения дифференциальных уравнений теплопроводности.

В целом, следует отметить, что эту модель можно было бы усилить, дополнив ее более подробным описанием механизма расплавления реагентов, предложенного в моделях [9] и [10].

**Модель [12]** рассматривает диффузию компонентов в диффузионно-контролируемых реакциях при высокой температуре, протекающих на границе металл-шлак. В основе данной модели лежит система дифференциальных уравнений массопереноса с учётом конвекции и диффузии. Также, здесь учитывается переход элементов через границу

металл-шлак. Уравнения данной системы являются одномерными по пространственной координате. Для решения полученной системы уравнений авторы предлагают использовать метод конечных разностей с явной схемой. Коэффициенты диффузии, являющиеся компонентами уравнений массопереноса, задаются фиксированными значениями. В рамках предложенной модели концентрации химических элементов рассчитываются не только для металлической, но и для шлаковой фазы, что является неоспоримым достоинством, позволяющим более достоверно отображать суть происходящих явлений. Уравнения решаются в декартовых координатах.

**В модели [13]** рассматривается технологическая операция – десульфурация чугуна – с применением газопорошковой продувки. Уравнение диффузии, учитывающее кинетический коэффициент, приведено в сферических и цилиндрических координатах, где коэффициент диффузии зависит от температуры металла (в отличие от модели [12], где он зафиксирован). В модели делается допущение о том, что продувочное сопло располагается в центре ковша, скорость вводимого в металл газа постоянна, а поток является осесимметричным.

Данная модель является универсальной, что позволяет применять её не только к десульфурации чугуна, но и к внепечной обработке стали.

В качестве недостатков данной модели можно отметить следующие моменты. Во-первых, в модели не учитываются гидродинамические процессы, что может существенно повлиять на результаты. Во-вторых, продувочное сопло только одно, что не всегда адекватно отражает конструкционные особенности существующих агрегатов.

**Выводы.** Растворение реагентов можно рассматривать с различных позиций: как растворение каждого отдельного куска, так и с учётом макропараметров сталеразливочного ковша в целом.

Анализируемые модели обладают разной степенью детализации, но все адекватны описываемым процессам и результаты их применения подтверждены экспериментально.

На основе сравнения существующих моделей согласно выделенным критериям были выявлены их достоинства и недостатки, позволившие внести уточнение в ранее разработанную математическую модель расплавления реагентов в жидкой стали при внепечной обработке. Однако следует отметить, что, ни в одной из рассматриваемых моделей не учитывается диффузия расплава внутрь реагента на первоначальном этапе расплавления. Введение в модели учёта данного эффекта позволит получить более полную картину исследуемых процессов.



Модели [12] и [13] позволяют получить распределение концентрации определённого химического элемента по высоте ковша, причём, в случае модели [12] – как в металлической, так и в шлаковой фазе. Однако для ковшей большой ёмкости распределение элемента может существенно варьироваться не только по высоте, но и по сечению ковша на различных уровнях.

Для практического применения наиболее достоверные результаты можно достичь, при одновременном использовании подходов, изложенных в работах [9 – 11] и в работах [12, 13].

**Список литературы:** 1. *Скворцов А.А.* Теплопередача и затвердевание стали в установках непрерывной разливки / *А.А. Скворцов, А.Д. Акименко.* – М.: Металлургия, 1966. – 190 с. 2. *Тепловые процессы при непрерывном литье стали: Под редакцией Ю.А.Самойловича.* – М.: Металлургия, 1982. – 152 с. 3. *Соболев В.В.* Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье / *В.В. Соболев.* – М.: Металлургия, 1988. – 160 с. 4. *Ефимов В.А.* Разливка и кристаллизация стали / *В.А. Ефимов.* – М.: Металлургия, 1976. – 552 с. 5. *Журавлев В.А.* Теплофизика формирования непрерывного слитка / *В.А. Журавлев, Е.М. Китаев.* – М.: Металлургия, 1974. – 216 с. 6. *Емельянов В.А.* Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок / *В.А. Емельянов.* – М.: Металлургия, 1988. – 143 с. 7. *Шмрга Л.* Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / *Л. Шмрга* / Пер. с чешск. Под ред. Кашина В.И. – М.: Металлургия, 1985. – 248 с. 8. *Бигеев А.М.* Металлургия стали / *А.М. Бигеев.* – Челябинск: Металлургия, 1988. – 479 с. 9. *Никулин А.Ю.* Математическое моделирование кинетики растворения реагентов при внепечной обработке черных металлов: Дис. ... д-ра техн. наук. – Магнитогорск, 1997. – 340 с. 10. *Жучков В.И.* Растворение ферросплавов в жидком металле / *В.И. Жучков, А.С. Носков, А.Л. Завьялов.* – Свердловск, УрО АН СССР, 1990. – 134 с. 11. *Девятков Д.Х.* Математическое моделирование и оптимальное управление в металлургии: Монография. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2007. – 350 с. 12. *Radune M.* Modelling and computer simulation of reagents diffusion in high temperature diffusion controlled heterogeneous reactions / *M. Radune, A. Radune, F. Assous, M. Zinigrad.* – Archives of Computational Materials Science and Surface Engineering. – 2009. – Vol. 1. – Iss. 4. – P. 225-231. 13. *Rodriguez Y.C.* Mathematical Model of Hot Metal Desulfurization by Powder Injection / *Y.C. Rodriguez, G.G. Muzquiz, J.R.P. Torres, L.E.R. Vidaurri* – Advances in Materials Science and Engineering. – 2012. – 51 p. 14. *Бабич А.В.* Эффективная обработка информации (Mind mapping) [Электронный ресурс] – URL: <http://www.intuit.ru/goto/course/mindmap> (дата обращения: 15.07.2012).

*Поступила в редакцию 05.04.2013*

*После доработки 01.07.13*

*Статью представил д-р техн. наук, проф., ГОУ ФБГОУ "МГТУ им. Носова" Девятков Д.Х.*

УДК: 669.1.046.554:669.15-198:519.87

**Порівняння математичних моделей розчинення реагентів у рідкій сталі / Снегирев Ю.В., Тугарова В.Д.** // Вісник НТУ "ХПИ". Серія: Інформатика та моделювання. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2013. – № 39 (1012). – С. 189 – 198.

У статті аналізуються математичні моделі розчинення реагентів у рідкому металлі при позапечній обробці. Порівняння моделей проводиться за наступними критеріями: вихідним даним, по температурі плавлення реагентів, умовам закінчення процесу розплавлення,

геометричним параметрам реагентів що вводяться. Для систематизації відомості про моделі представлені у вигляді ментальних карт. Іл.: 3. Бібліогр.: 14 назв.

**Ключові слова:** математична модель, розплавлення, реагент, позапічна обробка, критерії, ментальна карта.

UDC: 669.1.046.554:669.15-198:519.87

**Comparison of mathematical models of melting of reagents in liquid steel**  
*/ Snegirev Yu.V., Tutatrova V.D. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2013. – № 39 (1012). – P. 189 – 198.*

Mathematical models of melting of reagents in liquid metall during secondary treatment are analyzed in the article. Model comparison is accomplished according to the following criteria: source data, reagents melting temperature, conditions to finish modeling process, geometrical parameters of added reagents. Mind-maps are employed in order to classify data about models. Figs.: 3. Refs.: 14 titles.

**Keywords:** mathematical model, melting, reagents, secondary metal treatment, criterion, mind-map.