

5. Гринько А. Ю. Разработка критерия оценки термодинамического состояния системы «чугун-шлак» / А.Ю. Гринько, Д. Н. Тогобицкая, А. И. Белькова //

Системні технології. Міжрегіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ. – 2010. – Вип. 3(68). – С. 79-83.

пост. 25.05.11

Математическое моделирование рафинирования стали от неметаллических включений при внепечной обработке и непрерывной разливке

ЧИЧКАРЕВ Е.А., НАЗАРЕНКО Н.В., ИСАЕВ О.Б., КИСЛИЦА В.В.

Приазовский государственный технический университет
Мариупольский государственный университет
ОАО «МК «Азовсталь»

Построена математическая модель процесса коагуляции и удаления неметаллических включений из объема сталеразливочного ковша. Установлено, что условия перемешивания и флотации пузырями инертного газа или паров кальция не обеспечивают полного удаления продуктов коагуляции. Необходимым условием эффективного удаления алюминатов кальция является формирование жидких включений без сульфидной оболочки. Высокая эффективность рафинирования при непрерывной разливке обеспечивается за счет продувки в промежуточном ковше пузырьками аргона диаметром 1-3 мм.

A mathematical model of coagulation and removal of nonmetallic inclusions from the volume of steelmaking ladle. It is established, that the conditions of mixing and flotation bubbles of inert gas or calcium vapor are not provide complete removal of coagulation products. Prerequisite for the effective removal of calcium aluminate is the formation of liquid inclusions without sulfide shell. High efficiency of refining in a continuous casting is provided by blowing of argon bubbles with diameter of 1-3 mm in the tundish.

Побудовано математичну модель процесу коагуляції і видалення неметалевих включень із обсягу сталеливарного ковша. Встановлено, що умови перемішування і флотації бульбами інертного газу або пари кальцію не забезпечують повного видалення продуктів коагуляції. Необхідною умовою ефективного видалення алюмінатів кальцію є формування рідких включень без сульфідної оболонки. Висока ефективність рафінування у процесі безперервної розливання забезпечується за рахунок продувки в проміжному ковші бульбами аргону діаметром 1-3 мм.

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется проблеме производства «чистой» стали с пониженным содержанием неметаллических включений (НВ).

При внепечной обработке удаление неметаллических включений и растворенных примесей из расплавленного металла достигается преимущественно за счет перемешивания струей металла или продувки инертным газом (для ковшей небольшой емкости – и за счет или других способов перемешивания).

Основным механизмом удаления НВ является их укрупнение за счет ортокинетической коагуляции в турбулентных потоках и всплывание образовавшихся крупных частиц в ковшевой шлак. Неметаллические частицы, плохо смачиваемые расплавом, могут захватываться поверхностью пузырьков газа и вместе с ними всплывать на свободную поверхность. Твердые включения глинозема и кремнезема, плохо смачиваемые жидкой сталью, могут эффективно удаляться при помощи пузырьков газа.

Для рафинирования металла в процессе непрерывной разливки используют целый ряд технологических решений, также основанных на управлении перемешиванием жидкой стали - применение промежуточных ковшей (ПК) увеличенной емкости; секционирование объема ПК с помощью порогов и перегородок различной конфигурации; использование устройств типа «турбостоп», электромагнитное перемешивание, продувка инертным газом и др.

Количественные оценки кинетики коагуляции и удаления неметаллических включений (НВ) показали, что основным механизмом коагуляции является коагуляция в турбулентном потоке, а стоксовской коагуляцией и коагуляцией за счёт броуновского движения в большинстве случаев можно пренебречь. По мнению [1], оптимальную эффективность флотации НВ обеспечивают пузыри диаметром от 0,5 до 2 мм. В соответствии с результатами расчетов [2], эффективность флотации зависит от размеров НВ (мелкие НВ удаляются с трудом) и размеров пузырьков

газа (мелкие пузырьки газа обеспечивают более высокую скорость удаления НВ).

Однако в сталеразливочном ковше реальных размеров в условиях донной продувки аргоном только за счёт изменения ферростатического давления по высоте ковша диаметр пузырей будет далек от оптимального. Поэтому представляет и научный, и технический интерес модель коагуляции и удаления включений для крупного сталеразливочного ковша с далёким от оптимального средним диаметром пузырей газа.

Постановка задачи. В данной работе для оценки доли НВ, удаляемых на различных стадиях металлургического передела, и анализа изменения распределения по размерам НВ, остающихся в металле, разработана математическая моделирование процессов рафинирования в сталеразливочном ковше.

На скорость удаления НВ различных фракций существенное влияние оказывает флотация пузырьками инертного газа или при обработке кальцием – его паров.

Вероятность захвата неметаллического включения пузырьком инертного газа P определяется как произведение вероятностей собственно столкновения включения с пузырьком P_C , вероятности прилипания пузырька к поверхности P_A и удержания пузырька на поверхности $1-P_D$ (P_D – вероятность уноса включения с поверхностью) [1]:

$$P = P_C P_A \cdot (1 - P_D) \quad (1)$$

Вероятность закрепления частицы определяется вероятностями прилипания частицы и сохранения ее на пузырьке, поскольку в общем случае возможен отрыв первоначально прилипшей частицы, либо под действием силы тяжести, либо под влиянием сил инерции. Эти силы пропорциональны объему частиц, т. е. велики для крупных частиц и малы для мелких. Этот тривиальный факт приводит к кардинальным следствиям при анализе роли размера частиц в механизме элементарного акта флотации. Силы отрыва для частицы размером 100 мкм в 10^6 раз больше, чем для частицы размером 1 мкм [3].

Процесс сближения частицы с поверхностью пузырька претерпевает качественные изменения при переходе от больших (по сравнению с размером частицы) расстояний между их поверхностями к малым. Поток жидкости обтекает поверхность пузырька, линии тока жидкости искривляются, и в той или иной мере в это движение жидкости вовлекается частица.

Достаточно крупная частица под действием инерционных сил движется почти прямолинейно вплоть до столкновения с поверхностью пузырька. Процесс сближения крупных частиц с пузырьком обеспечивается инерционными силами, а в случае малых частиц этот процесс протекает безынерционно [3].

Чем меньше частица и чем меньше ее плотность отличается от плотности среды, тем меньше действующие на нее силы инерции и тем в большей степени ее траектория совпадает с линией тока жидкости.

Отношение величин инерционной силы и вязкого сопротивления среды характеризуется безразмерным критерием Стокса [3,4]:

$$St = \frac{2}{9} \rho_{нв} a^2 \cdot \frac{u_{нв}}{R} \cdot \frac{1}{\mu}, \quad (2)$$

где $\rho_{нв}$, a – плотность и радиус неметаллического включения; $u_{нв}$, R – скорость и радиус всплывающего газового пузыря; μ – динамическая вязкость жидкой среды.

Чем меньше величина этого критерия, тем меньше влияние инерционной силы на траекторию частицы, так как смещению частицы с соответствующей линией тока жидкости препятствует вязкое сопротивление среды. Рассмотрение осаждающейся частицы как материальной точки дает возможность показать, что инерционное осаждение частиц ниже некоторого критического размера, соответствующего критическому значению $St_c=1/12$, невозможно.

Вероятности захвата частиц НВ в (1) обычно объединяются в параметр эффективности столкновений. При учете конечного размера частиц осаждение возможно при любом их размере (любой величине St) и эффективность столкновений характеризуется формулой Сазерленда [3,4]:

$$E = 3 \cdot \frac{d_{нв}}{D} = \frac{6a}{D}, \quad (3)$$

где \bar{D} – средний диаметр газовых пузырей. Для расчёта среднего диаметра пузырей при продувке инертным газом в сталеразливочном ковше использовалась формула [5,6]:

$$d_b = 0,35 \cdot \left(\frac{Q_b^2}{g} \right)^{0,2}, \quad (4)$$

где Q_b – объемный расход газа; g – ускорение свободного падения.

Влияние инерционных сил газа при числе Стокса меньше критического заметно уменьшает эффективность столкновений [1-4]. Значение эффективности столкновения E_{St} , уменьшающееся по сравнению с E (по формуле Сазерленда), рассчитывались по формуле [3]:

$$E_{St} = E \cdot \mu, \quad \mu = \sin^2 \theta_t \left[1 - \frac{2 \cos \theta_t}{\sin^2 \theta_t} (1 - \cos \theta_t)^2 (2 + \cos \theta_t) \right], \quad (5)$$

где угол касания θ_t , характеризующий положение точки касания предельной траектории, рассчитывался по уравнению:

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 + \beta^2} - \beta, \quad \beta = \frac{2E}{9K^{III}}, \quad K^{III} = \frac{\Delta \rho}{\rho} St. \quad (6)$$

Кинетика флотации неметаллических включений пузырьками газа описывалась уравнением первого порядка [3,4]:

$$\frac{dc}{d\tau} = -k_F c, \quad (7)$$

где k_F – константа скорости, связанная со средним диаметром пузырей, средним диаметром частиц, интенсивностью продувки; c – концентрация включений. Константа скорости флотации рассчитывалась по формуле [3]:

$$k_F = \frac{3 \cdot E_{st} \cdot q}{2 \cdot D \cdot k_D} \quad (8)$$

где q – интенсивность продувки ($\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$) в расчете на 1 м^2 площади сечения барботажной зоны; k_D – коэффициент неоднородности диаметра пузырьков газа.

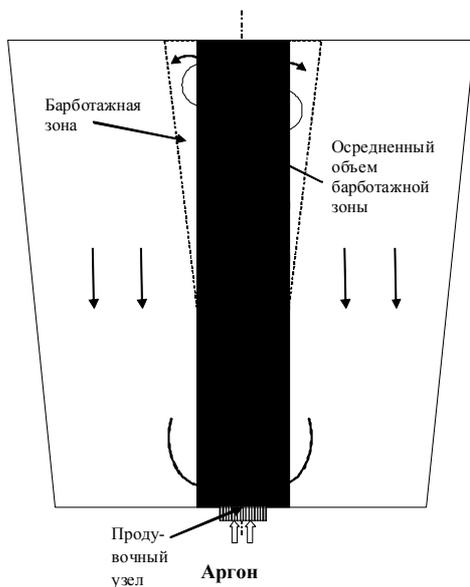


Рис. 1. Схема сталеразливочного ковша с перемешиванием инертным газом

При выполнении расчетов на базе предложенной модели были приняты следующие упрощающие предположения:

- объем ковша разделяется на зону барботажного перемешивания и возвратного течения, в среднем одинаковые по площади поперечного сечения (рис. 1);
- интенсивность продувки q рассчитывается на площадь поперечного сечения зоны барботажного перемешивания;
- средний диаметр пузырей газа в зоне барботажного перемешивания одинаков.

Результаты расчета кинетики флотации неметаллических включений различного диаметра в условиях продувки (без учета коагуляции) в сталеразливочном ковше представлены на рис. 2. Как видно из результатов расчета, в сталеразливочном ковше за счет механизма флотации эффективно удаляются лишь достаточно крупные включения.

На процесс удаления мелких НВ сильно влияет их укрупнение за счет коагуляции и всплывание или флотация образовавшихся крупных частиц в ковшевой шлак [7].

Для количественного описания рафинирования металла от НВ в сталеразливочном ковше, перемешиваемом инертным газом, использовано интегро-дифференциальное уравнение [8]:

$$\frac{\partial f(v, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{2} v \int_0^{\infty} K(\varphi, v - \varphi) f(\varphi) f(v - \varphi) d\varphi - \int_0^{\infty} K(\varphi, v) f(\varphi) f(v) d\varphi - S_{y\partial} (v, f(v)) \quad (9)$$

где $f(v, \tau)$ – плотность распределения количества включений по объему (нормированная на 1); v – объем НВ; τ – время; $S_{y\partial}$ – скорость удаления включений; $K(\varphi, v - \varphi)$ и $K(\varphi, v)$ – константы скорости коагуляции

При расчете константы скорости учитывались различные механизмы коагуляции: коагуляция в турбулентном потоке, стоковская, за счет броуновского движения. В частности, для коагуляции в турбулентном потоке [8,9]

$$K(v_1, v_2) = \gamma C \sqrt{\varepsilon / \eta} \left(\frac{d_{v_1} + d_{v_2}}{2} \right)^3 N_0, \quad (10)$$

где d_{v_1}, d_{v_2} – диаметры включений объемом v_1 и v_2 соответственно; ε – удельная энергия перемешивания; η – кинематическая вязкость металла; γ – эффективность столкновений; C – постоянная, равная $4/3$; N_0 – общее число НВ в расчете на единицу объема металла (число НВ с размерами, лежащими в интервале $v + dv$ составит $dn(v + dv) = N_0 \cdot f(v) dv$, $\int_0^{\infty} f(v) dv = 1$).

Средняя энергия перемешивания оценивалась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{Q \cdot P}{G} \cdot \frac{T}{273} \cdot \ln \left(\frac{P + \rho gh}{P} \right), \quad (11)$$

где Q – расход газа; P – давление над металлом; T – температура, К; ρ – плотность металла; h – глубина погружения фурмы, м; G – масса металла в ковше, кг.

Простейшая модель структуры потоков для сталеразливочного ковша в условиях перемешивания инертным газом – ячейка идеального смешения. В приближении идеального перемешивания НВ равномерно распределяются по объему ковша циркуляционными потоками и смещаются относительно металла со скоростью, соответствующей всплыванию под действием разности плотностей.

С учетом флотации скорость удаления НВ ($S_{y\partial}$) в шлак описывалась уравнением:

$$df(v_i)/d\tau = -f(v_i) \cdot (u(v_i)/H + k_F(v_i)), \quad (12)$$

где $u(v_i)$ – скорость всплывания НВ i – й фракции под воздействием разности плотностей; H – глубина металла в ковше.

Результаты расчета с использованием разработанной модели удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными для ковшей различной емкости. Принималось, что исходное распределение НВ по размерам логарифмически нормальное с математическим ожиданием 2 мкм. Алгоритм интегрирования уравнений (9) и (12) основывался на кусочно-линейной аппроксимации функции распределения НВ по размерам с контролем сохранения массы. Расчетное снижение объемной доли неметаллических включений или числа НВ в единице объема вследствие коагуляции сопровождается ростом среднего размера НВ, причем условия перемешивания в сталеразливочном ковше и флотации пузырьками инертного газа или паров кальция не обеспечивают

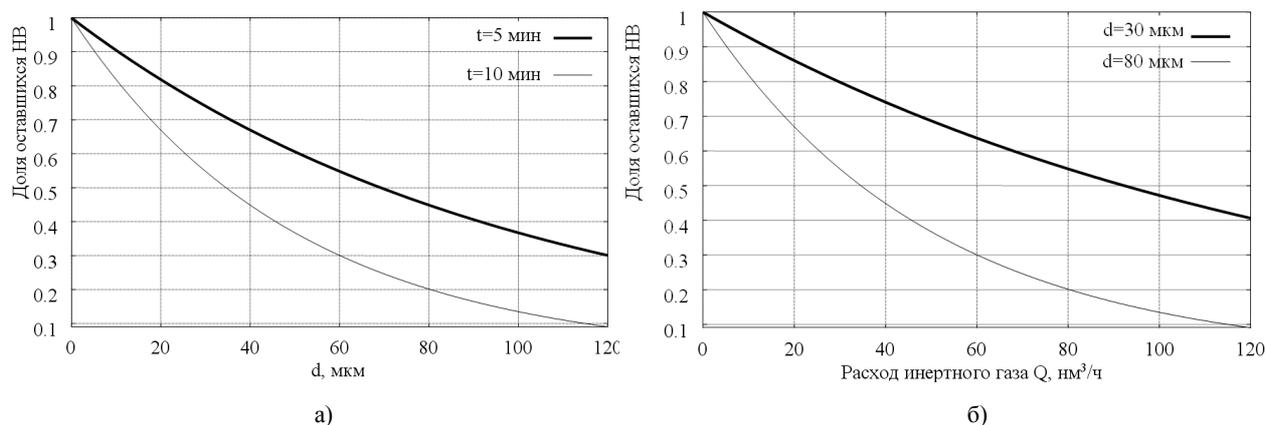


Рис. 2. Результаты расчета остаточного содержания НВ в металле после продувки инертным газом: а) в зависимости от среднего диаметра НВ; б) в зависимости от расхода газа.

полного удаления продуктов коагуляции.

Учитывая достаточно медленное удаление НВ из ковшей емкостью 160 и 350 т при интенсивностях донной продувки инертным газом, используемых в производстве раскисленных алюминием низкоуглеродистых сталей, основной объем присадок алюминия целесообразно производить при выпуске плавки из конвертера.

Этот вывод подтверждается промышленным экспериментом (выплавка стали марки Х70 производилась в 160-т конвертере, на выпуске сталь раскисляли кремний- и марганецсодержащими ферросплавами и чушковым алюминием). Установлено, что уровень загрязненности листового проката оксидными НВ зависит от величины добавки алюминиевой катанки в процессе доводки.

Условия зародышеобразования и коагуляции первичных включений оказывают существенное влияние на загрязненность проката НВ. Установлено, что минимальная загрязненность проката обеспечивается за счёт присадки алюминия на сливе плавки из конвертера из расчёта достижения массовой доли 0,03-0,04 %.

Как показал расчёт скорости удалений НВ для различных вариантов донной продувки инертным газом в 350-т и 160-т ковшах, рост продолжительности продувки не приводит к существенному снижению загрязнённости металла оксидными НВ либо слабому росту суммарной загрязненности за счёт вторичного окисления.

Возможность удаления неметаллических включений при обработке кальцием зависит от их агрегатного состояния и возможности формирования сульфидной оболочки.

Исследование уровня загрязненности листового проката из трубных марок стали (Х70, 09Г2ФБ) оксидными и окисульфидными НВ показало, что балл по хрупким и недеформируемым силикатам по ГОСТ 1778 (Ш6) зависит преимущественно от технологии раскисления и обработки кальцием. При этом для плавков, на которых содержание серы в металле перед обработкой кальцием свыше 0,004 %, увеличение продолжительности донной продувки ведет к росту балла загрязненности листового проката неметаллическими включениями при практически

неизменной массовой доле алюминия, связанного в оксиды (см. таблицу).

Таблица. Среднее время донной продувки на плавках с различным баллом загрязненности НВ

Средний балл загрязненности НВ по ГОСТ 1778 (Ш6)	2,0-2,5	2,5-3,0	> 3,0
Среднее время донной продувки на агрегате доводки стали	20,6	21,4	24,0

В группе плавков с низким баллом загрязненности хрупкими и недеформированными силикатами отсутствовала сульфидная оболочка НВ, что способствовало их быстрой коагуляции и удалению из объема металла. Четко выраженное влияние массовой доли серы в металле перед обработкой кальцием на балл загрязненности готового проката хрупкими силикатами (которые фактически представляют собой раскатанные крупные неметаллические включения алюминатов кальция) иллюстрируется рис. 3. Как показали результаты промышленного эксперимента, для формирования жидких оксидных НВ и предотвращения формирования сульфидной оболочки, препятствующей коагуляции, удельный расход кальция в ходе внепечной обработки должен выбираться в зависимости от концентрации серы и алюминия в металле

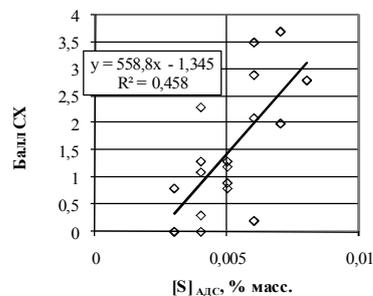


Рис. 3. Взаимосвязь между загрязненностью металла хрупкими силикатами и массовой долей серы в металле (сталь Х70).

Скорость удаления НВ в промежуточном ковше при непрерывной разливке в области с умеренной или слабо развитой турбулентностью, где преобладают процессы рафинирования, оценивалась по результатам решения системы уравнений переноса:

$$w \frac{\partial f(v_i)}{\partial x} + u(v_i) \frac{\partial f(v_i)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 f(v_i)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 f(v_i)}{\partial y^2}, \quad (13)$$

$$i = 1, \dots, N;$$

где N – число фракций НВ по объему; $u(v_i)$ – скорость всплывания включений фракции со средним объемом v_i ; D_x, D_y – эффективные коэффициенты турбулентной диффузии; w – осредненная скорость течения жидкости в сечении ПК; $f(v)$ – плотность распределения НВ по размерам. Решение системы (13) осуществлялось сеточным методом с использованием кусочно-постоянного представления $f(v)$.

В результате экспериментов на гидравлической модели ПК по импульсному вводу раствора соляной кислоты с кондуктометрической регистрацией ее концентрации установлено, что для разливочной секции ПК с перфорированной перегородкой (9 каналов, относительное сечение каналов $S_{отв}/S_{ПК} = 0,1$) среднее значение числа Пекле $Pe = (wL_{PC})/D_E = 3,6$, а для ПК без перегородок $Pe = (wL_{ПК})/D_E = 8,5$ (L_{PC} – длина разливочной секции, $L_{ПК}$ – длина промковша). По средним значениям чисел Пекле нетрудно определить и значения эффективного коэффициента диффузии D_E (можно принять $D_x = D_y = D_E$).

Проведенные расчеты остаточного содержания НВ в металле с использованием разработанных математических моделей при различных вариантах выполнения каналов в перегородках показали, что увеличение числа отверстий (при сохранении постоянным их суммарного сечения) приводит к снижению общей загрязненности металла НВ. В этом же направлении, но несколько сильнее влияет снижение суммарного сечения каналов в перегородке (чем меньше суммарное сечение, тем сильнее развиваются процессы коагуляции).

В последние годы различные исследователи [7, 10] уделяют значительное внимание совершенствованию технологии непрерывной разливки стали с использованием продувки инертным газом в промежуточном ковше.

Представленный выше способ расчета константы скорости флотации позволяет оценить и рациональные условия рафинирования стали в промежуточном ковше. Снижение содержания неметаллических включений в потоке металла через область барботажа в объеме промежуточного ковша, упрощенно представленную ячейкой идеального смешения, описывается соотношением (без учета соотношений (5) и (6)):

$$\frac{c}{c_{ex}} = 1 / \left(1 + \frac{9}{2} \cdot \frac{Q}{R} \cdot \frac{d_{нв} h}{D^2 k_D} \right), \quad (14)$$

где Q, R – объемный расход инертного газа и объемная скорость разливки (m^3/c в расчете на 1 секцию); c, c_{ex} – объемная доля неметаллических включений в потоке металла после и до продувочного узла.

Таким образом, для условий продувки аргоном в разливочной секции промежуточного ковша МНЛЗ эффективность флотации зависит от размеров НВ (мелкие НВ удаляются с трудом) и размеров пузырьков газа (мелкие пузырьки газа обеспечивают более

высокую скорость удаления НВ). Данная оценка хорошо согласуется с результатами, представленными в [11]. По данным [10-11], современные продувочные блоки обеспечивают формирование пузырьков пузыри диаметром 1-3 мм, которые обеспечивают эффективное рафинирование стали.

Выводы

1. На основании результатов расчетного анализа процесса удаления неметаллических включений из объема крупного сталеразливочного ковша установлено, что за счет механизма флотации пузырьками инертного газа эффективно удаляются лишь достаточно крупные включения.
2. Расчетное снижение объемной доли неметаллических включений или числа НВ в единице объема вследствие коагуляции сопровождается ростом среднего размера НВ, причем условия перемешивания в сталеразливочном ковше и флотации пузырями инертного газа или паров кальция не обеспечивают полного удаления продуктов коагуляции.
3. Возможность удаления неметаллических включений при обработке кальцием зависит от их агрегатного состояния. Увеличение продолжительности донной продувки инертным газом слабо влияет на суммарную загрязненность металла оксидными включениями, поэтому для эффективного удаления алюминатов кальция за счет коагуляции и флотации пузырями аргона или паров кальция необходимым условием является формирование жидких включений и отсутствие сульфидной оболочки.
4. Показано, что для условий продувки аргоном в разливочной секции промежуточного ковша МНЛЗ а эффективность флотации зависит от размеров НВ (мелкие НВ удаляются с трудом) и размеров пузырьков газа (мелкие пузырьки газа обеспечивают более высокую скорость удаления НВ). Оптимальную эффективность рафинирования обеспечивается при формировании пузырей диаметром 1-3 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Laihua Wang, Hae-Geon Lee, Peter Hayes. Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation // ISIJ International. Vol. 36 (1996), No. 1, pp. 7-16
2. Mathematical Model for Growth and Removal of Inclusion in a Multi-tuyere Ladle during Gas-stirring / Li Tao Wang, Qiao Ying Zhang, Shi Heng Peng et al. // ISIJ Int., vol. 45. – 2005. – N 3. – PP.331-337.
3. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Микрофлотация: водоочистка, обогащение. – М.: Химия, 1986. – 112 с.
4. Пенная сепарация и колонная флотация / Рубинштейн Ю.Б., Мелик-Гайвазян В.И., Матвиенко Н.В. и др. // М.: Наука, 1989. – 304 с.
5. Aoki, J., Lifeng Zhang, Brian G. Thomas, "Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining," 3rd Internat. Congress on Science & Technology of Steelmaking, Charlotte, NC, May 9-11, 2005, Association for Iron & Steel Technology, Warrendale, PA, pp. 319-332.
6. Davidson J.F., Shuler B.O.G. Bubble formation at the orifice in a viscous liquid. Transactions of the Institution of Chemical Engineers. 1960, Vol.38. 3, pp.144-154.

-
7. Lifeng ZHANG, Brian G. THOMAS. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness // *ISIJ International*, Vol. 43 (2003), No. 3, pp. 271-291
 8. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали /Исаев О.Б., Чичкарев Е.А., Кислица В.В. и др. // М.: Металлургия, 2008. – 376 с.
 9. Model Experiment on Inclusion Removal by Bubble Flotation Accompanied by Particle Coagulation in Turbulent Flow / Hirofada ARAI, Katsutoshi MATSUMOTO, Shin-ichi SHIMASAKI, Shoji TANIGUCHI// *ISIJ International*, Vol. 49 (2009), No. 7, pp. 965–974
 10. Ефимова В.Г. Эффективные технологии рафинирования стали в промежуточных ковшах МНЛЗ // *Наукові праці ДонНТУ.Металургія*. –вип.12(177)–2010. -С.108-114.
 11. Кислица В.В., Исаев О.Б., Матросов Ю.И., Белоусов В.В., Гончар Б.С., Дюк Е.Ф. Исследование гидрогазодинамики процесса рафинирования металла в промежуточных ковшах // *Сталь*. - 2009. - №8. - С. 27-27.

пост. 26.05.11