

- mysh'iaka pri rafinirovanii zhelezouglerodistykh rasplavov. *Tezisy dokladov 8 konf. «Fiziko-khimicheskie osnovy proizvodstva stali»* [Some peculiarities of arsenic behavior during refining of iron-carbon melts. Abstracts of 8th Conf. «Physico-chemical fundamentals of steel production»]. Moscow, 1977, no.1, p. 61. (Rus.)
7. GOST 5639-82. *Stali i splavy. Metody vyivleniia i opredeleniia velichiny zerna* [Steels and alloys. Methods for the detection and determination of grain size]. Moscow, State Standard of the USSR Publ., 1982. 21 p.
  8. ISO 643-2003. Steels – Micrographic determination of the apparent grain size. 2003. 42 p.

Рецензент: В.Г. Єфременко  
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 11.09.2017

УДК 669.18

© Чичкарев Е.А.<sup>1</sup>, Алексеева В.А.<sup>2</sup>

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УДАЛЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

*Сформулирована комбинированная математическая модель удаления неметаллических включений в промковше слябовой МНЛЗ за счет флотации и всплывания. Рост доли объема промковша с режимом идеального вытеснения (с ламинарным течением) ведет к снижению остаточной доли неметаллических включений. При продувке аргоном в промковше эффективность флотации зависит от размера неметаллических включений, размера пузырьков газа, среднего времени пребывания металла.*

**Ключевые слова:** неметаллические включения, продувка инертным газом, кривая RTD, ячейка идеального смешения, ячейка идеального вытеснения.

**Чичкарьов Є.А., Алексеева В.А. Моделювання процесів видалення неметалевих включень у проміжному ковші слябової МБЛЗ.** Сформульована комбінована математична модель видалення неметалевих включень в промковшій слябової МБЛЗ за рахунок флотації та спливання. Зростання частки обсягу промковша з режимом ідеального витіснення (з ламінарним плином) веде до зниження залишкової частки неметалевих включень. Під час продування аргоном в промковшій ефективність флотації залежить від розміру неметалевих включень, розміру бульбашок газу, середнього часу перебування металу.

**Ключові слова:** неметалеві включення, продування інертним газом, крива RTD, осередок ідеального змішування, осередок ідеального витіснення.

**E.A. Chychkarov, V.A. Alekseeva. Modelling the processes of nonmetallic inclusions removal in the tundish of the slab CCM.** The analysis of the main approaches to the description of the processes of nonmetallic inclusions removal in the tundish during continuous casting is performed. It is shown that in studying the hydrodynamic processes in the tundish, the distribution curves of residence time (RTD) are widely used, which are described by a combination of idealized cells. A combined mathematical model for the removal of nonmetallic inclusions in the tundish of slab CCM due to flotation and floating is formulated. The possibilities of their removal for limiting variants of mixing condi-

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [influence@meta.ua](mailto:influence@meta.ua)

<sup>2</sup> ассистент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [aveni0333@gmail.com](mailto:aveni0333@gmail.com)

*tions, ideal mixing and ideal plug cells, as well as the possibility of removal of nonmetallic inclusions with intermediate variants of stirring intensity, in the presence of circulation flows, are analyzed. It is shown that the comparatively higher proportion of large non-metallic inclusions remains at the outlet of the ideal mixing cell than in the outlet of the ideal plug cell, the increase in the fraction of the ladle volume with the ideal plug regime (with laminar flow) leads to a decrease in the residual fraction of nonmetallic inclusions. It has been determined by calculation that when blowing with argon in the casting section of the tundish of a two-strand continuous casting machine, the flotation efficiency depends on the size of the nonmetallic inclusions (small inclusions are practically not removed) and the size of the gas bubbles (small gas bubbles and a decrease in their dispersion in size provide a higher rate of removal of nonmetallic inclusions), as well as the average residence time of the metal in the bubbling zone. It has been calculated that the flotation of nonmetallic inclusions significantly increases the rate of removal of small particles with a diameter of 20-40  $\mu\text{m}$ , which are practically not removed in the tundish without blowing, only with flow control devices. The results of the calculation are confirmed by the results of industrial experiments.*

**Keywords:** *nonmetallic inclusions, blowing with inert gas, RTD curve, ideal mixing cell, ideal plug cell.*

**Постановка проблеми.** Перемешивание расплава в ковше оказывает большое влияние на изменение размеров и удаление неметаллических включений (НВ), обеспечивая укрупнение включений и их перенос к поверхности раздела металл-шлак. Неметаллические частицы, плохо смачиваемые расплавом, могут захватываться поверхностью пузырьков газа и вместе с ними всплывать на свободную поверхность. 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 вопросы влияния различных устройств управления потоками и условий продувки инертным газом (как по отдельности, так и при совместном использовании) на удаление неметаллических включений различных размерных групп остаются дискуссионными.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время контроль потоков расплава и процессов перемешивания в промежуточном ковше является важным компонентом технологии, обеспечивающей высокое качество металла при непрерывном литье [1]. Улучшению условий удаления неметаллических включений в промежуточном ковше способствуют размещение в нем устройств контроля потоков (различные виды сплошных перегородок, перегородки с наклонными отверстиями, ингибиторы турбулентности) и продувка инертным газом [2-7]. Для совершенствования условий непрерывной разливки и конструкций промежуточных ковшей используются два метода исследования – физическое моделирование и математическое моделирование [8-11].

Исследование гидродинамических процессов в разливочных устройствах с использованием физического моделирования (как правило, на прозрачных моделях) позволяет находить застойные зоны, оценивать скорость модельного потока жидкости в разных точках и исследовать время пребывания протока в разливочном устройстве. Для изучения характеристик потоков металла в промежуточном ковше широко использовалась оценка различных параметров распределения времени пребывания (RTD) с помощью метода импульсного добавления индикатора [12-14]. Результаты физического моделирования с использованием ввода индикатора обычно сочетаются с ячеечными моделями, включающими идеализированные ячейки идеального смешения, идеального вытеснения и «мертвые зоны» [2, 15, 16].

Для исследования удаления неметаллических включений в разливочных устройствах рядом авторов рекомендовано использование методов компьютерного моделирования динамики жидкости [17, 18]. Во многих работах кривые распределения времени пребывания основаны на результатах математического моделирования и иллюстрируют адекватность его результатов [19-21].

Для описания удаления неметаллических включений используются подходы, основанные на анализе траекторий частиц с действующими на них комплексными силами и наличием турбулентных флуктуаций [1-3], или уравнения турбулентной диффузии [22]. При обоих подходах

прямое удаление включений в шлаке происходит из-за сил плавучести, принимая во внимание эмпирические формулы для физических свойств рафинирующего шлака и его взаимодействия с неметаллическими включениями.

Использование устройства контроля потока в разливочном устройстве значительно влияет на возможность удаления неметаллических включений различных размерных групп. Для удаления мелких частиц отмечалась возможность коагуляции и коалесценции [1, 2] (достигнутая в условиях полностью развитой турбулентности) или продувки инертным газом [16, 19]. По мнению [19], эффективность удаления небольших включений возрастает за счет прилипания их к пузырькам инертного газа и за счет удлинения траектории потоков металла. Результаты промышленного эксперимента показывают, что среднее содержание включений размером менее 20 мкм уменьшается более чем на 24%, а среднее содержание кислорода снижается примерно на 15% при контроле за рациональными параметрами продувки.

Совместное использование устройств контроля потока и завесы пузырьков аргона в проковше изменяет картину потока жидкой стали, что способствует столкновению, коалесценции и флотации включений, захвату широкого спектра размеров включений пузырьками при движении рециркуляционных потоков металла в продольном направлении. Интенсивность барботажа должна контролироваться надлежащим образом, поскольку чрезмерный поток инертного газа способствует турбулизации поверхностных слоев металла, эмульгированию окислительного шлака и вторичному окислению стали кислородом воздуха. Если учитывать все эти факторы, то инъекцию инертного газа можно использовать в качестве средства повышения чистоты стали [16].

Однако в сталеразливочных и отчасти промежуточных ковшах реальных размеров в условиях донной продувки аргоном только за счет изменения ферростатического давления по высоте ковша диаметр пузырьков будет далек от оптимального. Поэтому представляет и научный и практический интерес модель коагуляции и удаления из расплава включений с пузырьками газа, средний диаметр которых далек от оптимального, для крупного сталеразливочного ковша.

**Цель статьи.** В данной работе представлены результаты исследования процессов всплывания и флотации неметаллических включений внутри секционированного промежуточного ковша двухручьевого слябовой МНЛЗ. Рассмотрено влияние различных факторов (наличия и поперечного сечения отверстий в перегородках, интенсивности продувки инертным газом, площади барботажа). Исследование проведено с использованием разработанной математической модели процессов флотации и всплывания НВ. Особенностью предложенной модели является представление промежуточного ковша в виде комбинации ячеек идеального смешения, идеального вытеснения и барботажной зоны (при использовании продувки инертным газом).

Основной целью статьи является анализ изменения количества и распределения по размерам НВ, остающихся в металле, в зависимости от наличия и параметров устройств управления потоками и условий продувки инертным газом.

**Изложение основного материала.** *Моделирование всплывания неметаллических включений в промежуточном ковше.* Промежуточный ковш МНЛЗ является проточной емкостью, поэтому удаление неметаллических процессов в нем является стационарным или близким к стационарному процессу. Для описания структуры потоков в проточных аппаратах широко применяются представления об идеализированных ячейках идеального вытеснения и идеального смешения. Результаты исследований структуры потоков в промежуточном ковше методом импульсного ввода индикатора описываются комбинацией ячеек идеального вытеснения и идеального смешения [2, 15]. Удаление НВ за счет всплывания в промежуточном ковше можно описать следующей формулой [23] для расчета их относительного остаточного содержания (в предположении, что структура потоков описывается ячейкой идеального вытеснения):

$$\varphi = \frac{n}{n_0} = 1 - \frac{u \cdot S}{R'} = 1 - \frac{u \cdot S \cdot \rho}{R}, \quad (1)$$

где  $n$ ,  $n_0$  – содержание неметаллических включений в единице объема металла, шт/м<sup>3</sup>;  $u$  – скорость всплывания НВ, м/с;  $S$  – площадь зеркала металла, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность жидкой стали, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – массовая скорость разливки, кг/с.

Для области объема промежуточного ковша с интенсивным перемешиванием (например, струей падающего металла), которая описывается ячейкой идеального смешения, предложена аналогичная формула:

$$\varphi = \frac{n}{n_0} = \frac{1}{1 + \frac{u \cdot S \cdot \rho}{R}} \quad (2)$$

Промежуточное положение между двумя крайними случаями занимает ячейка с перемешиванием, близким к идеальному, лишь в направлении поперек потока. Для нее по данным [23] остаточное содержание НВ рассчитывается по формуле:

$$\varphi = \frac{n}{n_0} = \exp\left(-\frac{u \cdot \rho \cdot S}{R}\right) \quad (3)$$

Формирование циркуляционных потоков в промежуточном ковше конечных размеров серьезно сказывается на условиях рафинирования стали. Если пренебречь обменом между зонами прямого и обратного потока, то для промковша в целом относительная концентрация НВ на выходе зоны потока вдоль зеркала металла (прямого):

$$\varphi = \frac{c_2}{c_0} = \frac{1}{K_u \left(\frac{1}{f} - 1\right) + 1} \quad (4)$$

где  $f$  – отношения объемных концентраций НВ на входе и выходе зоны прямого потока;  $K_u$  – кратность циркуляции.

Расчетное количество неметаллических включений, остающихся в металле на выходе ячеек идеального смешения и идеального вытеснения для одних и тех же скорости разливки (50 кг/с для одного ручья) и площади поверхности раздела металл-шлак (2 м<sup>2</sup>), показано на рис. 1.

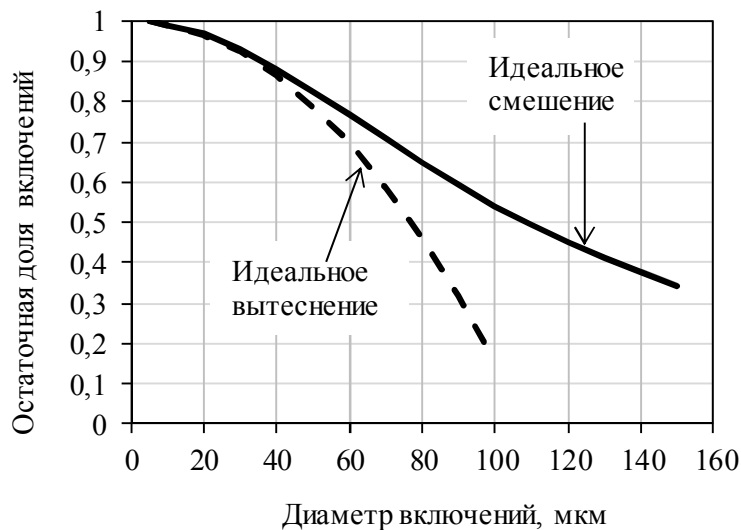


Рис. 1 – Расчетная остаточная доля неметаллических включений на выходе ячейки идеального смешения и идеального вытеснения

Как видно из рис. 1, на выходе ячейки идеального смешения остается сравнительно большая доля крупных неметаллических включений, чем на выходе ячейки идеального вытеснения. Между тем небольшие мелкие неметаллические включения со средним диаметром менее 40 микрон плохо удаляются в обоих случаях.

В зависимости от конструкции промежуточного ковша (и, соответственно, соотношения параметров условных секций смешения/вытеснения) условия рафинирования существенно отличаются. Для эффективного рафинирования металла в объеме ПК используется целый ряд

конструктивных особенностей и внутренних устройств: перфорированные или фильтрационные перегородки и/или пороги, система «турбостоп», устройства для продувки нейтральными газами, гасители турбулентности и т.п. Поэтому модель структуры потоков для промежуточного ковша описывается по меньшей мере двумя идеализированными ячейками – смешения и вытеснения [15, 21]. Результаты расчета остаточной доли неметаллических включений для различных вариантов комбинаций идеализированных ячеек показаны на рис. 2 (емкость секционированного промежуточного ковша слэбовой МНЛЗ – 43 т, площадь границы раздела металл-шлак приемной секции – 3,42 м<sup>2</sup>, площадь зеркала металла одной разливочной секции – 1,73 м<sup>2</sup>; скорость разливки – 50 кг/с на один ручей).

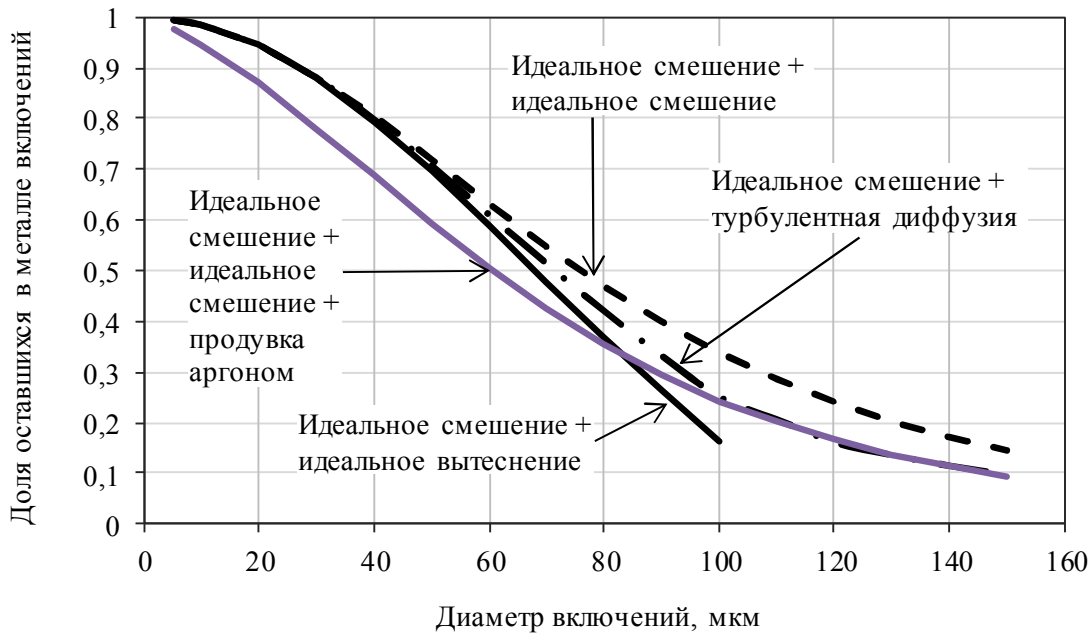


Рис. 2 – Изменение остаточной доли неметаллических включений в зависимости от их диаметра, рассчитанное для различных комбинаций моделей

Более сложное представление структуры потоков в промковше дает модель с диффузионным обратным перемешиванием. Перемещение НВ с потоками металла можно приближенно описать как турбулентную диффузию, а перемещение относительно потоков – как упорядоченное движение со скоростью всплывания, соответствующей размеру частиц (двухпараметрическая модель с обратным перемешиванием) [23]. Скорость квазистационарного процесса удаления НВ в области с умеренной или слабо развитой турбулентностью, где преобладают процессы рафинирования, оценивалась по результатам решения системы уравнений переноса [23]:

$$w \frac{\partial f(v_i)}{\partial x} + u(v_i) \frac{\partial f(v_i)}{\partial y} = D_x \frac{\partial^2 f(v_i)}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 f(v_i)}{\partial y^2}, \quad i = 1, \dots, N, \quad (5)$$

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 (предполагалось, что  $D_x = D_y = D_E$ );  $w$  – осредненная скорость течения жидкости в сечении ПК;  $f(v)$  – плотность распределения НВ по размерам. Решение системы (5) осуществлялось сеточным методом с использованием кусочно-постоянного представления  $f(v)$ .

В результате экспериментов на гидравлической модели ПК [23] по импульсному вводу раствора соляной кислоты с кондуктометрической регистрацией ее концентрации установлено, что для разливочной секции ПК с перфорированной перегородкой 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  $D_x = D_y = D_E$ ).

Расчеты для модели, описываемой уравнением (5), проводились с использованием коэффициента диффузии для разливочной секции, рассчитанного по уравнению  $Pe = (wL_{PC})/D_E = 3,6$  с использованием результатов физического моделирования.

В целом эффективность удаления неметаллических включений в разливочном устройстве с турбулентным потоком оказалась ниже, чем для идеализированных случаев, показанных выше. Из приведенных на рис. 1 и 2 результатов расчета можно сделать вывод, что чем меньше объем зоны идеального смещения и/или чем выше объем зоны идеального вытеснения, тем ниже концентрация неметаллических включений в металле на выходе промежуточного ковша.

Моделирование процесса флотации неметаллических включений. Важным механизмом удаления НВ различных фракций является их флотация пузырьками инертного газа (или паров при обработке щелочноземельными элементами).

Возможность закрепления и уноса неметаллической частицы с пузырьком инертного газа описывается произведением вероятностей нескольких процессов: собственно, столкновения включения с пузырьком  $P_C$ , прилипания пузырька к поверхности включения  $P_A$  и удержания частицы на его поверхности  $(1 - P_D)$ , где  $P_D$  – вероятность уноса включения с поверхности [24, 25]:

$$P = P_C P_A (1 - P_D). \quad (6)$$

Возможность закрепления частицы на поверхности пузырька зависит от соотношения сил сцепления и сил тяжести или инерции, величина которых пропорциональна объему частиц: силы отрыва для частицы размером 100 мкм в  $10^6$  раз больше, чем для частицы размером 1 мкм [24, 25]. Взвешенные в жидкости частицы вовлекаются в движение вдоль поверхности всплывающих пузырьков. Траектории частиц, которые сближаются с поверхностью пузырька, существенно изменяются при переходе от больших (по сравнению с размером частицы) расстояний между их поверхностями к малым [24-26]. Движение крупных частиц под действием инерционных сил почти прямолинейно вплоть до столкновения с поверхностью пузырька. Для малых частиц этот процесс протекает безынерционно [26], поэтому их траектории близки к линиям тока жидкости.

Для качественной оценки соотношения отношения величин инерционных сил и сил вязкого сопротивления среды предложен безразмерный критерий Стокса [26, 27]:

$$St = \frac{2}{9} \rho_{НВ} a^2 \frac{u_{вз}}{R} \frac{1}{\mu}, \quad (7)$$

где  $\rho_{НВ}$ ,  $a$  – плотность и радиус неметаллического включения;  $u_{вз}$ ,  $R$  – скорость и радиус всплывающего газового пузырька;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкой среды.

Смещению частицы с соответствующей линии тока жидкости препятствует вязкое сопротивление среды, поэтому с уменьшением величины этого критерия уменьшается и влияние инерционной силы на траекторию частицы. Инерционное осаждение частицы (как материальной точки) с размером меньше граничного, соответствующего критическому значению  $St_c = 1/12$ , невозможно.

Вместо анализа вероятностей захвата частиц НВ часто используется параметр эффективности столкновений. Для достаточно крупных пузырьков эффективность захвата ими частиц НВ характеризуется формулой Сазерленда [26, 27]:

$$E = 3 \frac{d_{НВ}}{\bar{D}} = 6a / \bar{D}, \quad (8)$$

где  $\bar{D}$  – средний диаметр газовых пузырьков.

При учете конечного размера частиц их осаждение возможно при любой величине  $St$ .

Для расчета среднего диаметра газовых пузырьков использована формула [5, 6]:

$$d_b = 0,35(Q_b^2 / g)^{0,2}, \quad (9)$$

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

Уточненное значение эффективности столкновения  $E_{St}$ , уменьшающееся по сравнению с  $E$  по формуле (8) за счет влияния инерционных сил при  $St < St_c$  [1-4], рассчитывали по формуле [26]:

$$E_{St} = E \cdot \mu \left( \frac{a}{R}, St \right), \quad (10)$$

причем

$$\mu \left( \frac{a}{R}, St \right) < 1, \quad \mu = \sin^2 \theta_t \left[ 1 - \frac{2 \cos \theta_t}{\sin^2 \theta_t} (1 - \cos \theta_t)^2 (2 + \cos \theta_t) \right], \quad (11)$$

где  $\theta_t$  – угол касания, характеризующий положение точки касания предельной траектории, рассчитывается из уравнения

$$\cos \theta_t = \sqrt{1 + \beta^2} - \beta, \quad (12)$$

(здесь  $\beta = 2E/9K^{III}$ ,  $K^{III} = \frac{\Delta \rho}{\rho} St$ ,  $\rho$  – плотность металла).

Флотация неметаллических включений пузырьками газа описывается кинетическим уравнением первого порядка [26, 27]:

$$dc/d\tau = -k_F c, \quad (13)$$

где  $c$  – концентрация включений,  $k_F$  – константа скорости флотации, которая рассчитывалась по формуле [3]:

$$k_F = 3E_{St}q/2\bar{D}k_D, \quad (14)$$

где  $q$  – интенсивность продувки,  $m^3/(m^2 \cdot c)$  в расчете на  $1 m^2$  площади сечения барботажной зоны;  $k_D$  – коэффициент неоднородности диаметра пузырьков газа;  $E_{St}$  – уточненное значение эффективности столкновений.

Продувка инертным газом в пузырьковом режиме обеспечивает широкие возможности удаления неметаллических включений в промежуточном ковше [11, 12]. Предложенная модель (уравнения (10)-(14)) позволила оценить остаточную концентрацию неметаллических включений на выходе промежуточного ковша с продувкой инертным газом. Остаточная концентрация НВ в металле на выходе барботажной зоны (с учетом стационарности потока металл) рассчитывалась по уравнению:

$$\frac{c_1}{c_0} = \frac{1}{1 + k_F \theta}, \quad (15)$$

где  $c_0, c_1$  – концентрация НВ в металле перед и на выходе из барботажной зоны ПК;  $\theta = V_b / R$  – среднее время пребывания металла в барботажной зоне;  $V_b$  – объем барботажной зоны;  $R$  – объемная скорость разлива в расчете на 1 секцию ПК,  $m^3/c$ . Снижение концентрации НВ возможно за счёт увеличения времени пребывания (т.е. фактически увеличения объема барботажной зоны) и за счет увеличения константы скорости  $k_F$ , что достижимо за счёт уменьшения среднего диаметра пузырьков и дисперсии распределения их по размерам (см. (15)).

Результаты расчета удаления неметаллических включений в секционированном промежуточном ковше с продувкой инертным газом показаны на рис. 3.

При проведении расчетов предполагалось, что весь объем промежуточного ковша разделен на ячейку идеального смешения (между пузырьковыми завесами) и две секции с циркуляцией вдоль границы металл-шлак (площадь  $2,3 m^2$ ). Секции разделялись барботажными зонами средней шириной  $0,2 m$ . Предполагалось, что расход газа составляет  $3 m^3/ч$  со средним диаметром пузырьков газа  $1 cm$ .

Как видно из приведенных на рис. 2 и 3 графиков, флотация неметаллических включений значительно увеличивает скорость удаления мелких частиц диаметром  $20-40 \mu m$ , которые практически не удаляются в промежуточном ковше без продувки, только с устройствами управления потоками. Для удаления мелких неметаллических включений необходимо образование мелких пузырьков газа. Влияние диаметров пузырьков на удаление НВ показано на

рис. 3, где видно, что мелкие пузырьки газа более эффективны при флотации мелких и средних включений.

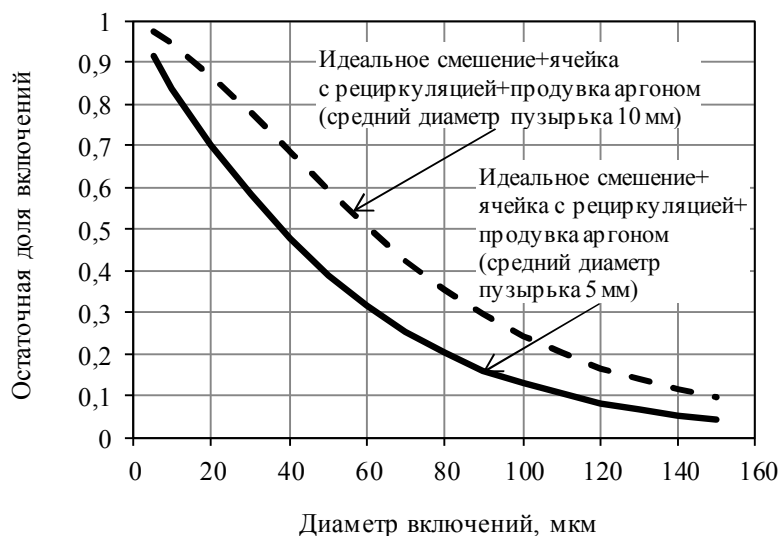


Рис. 3 – Изменение остаточной доли неметаллических включений в зависимости от их диаметра, рассчитанное для разных диаметров пузырьков

Представленные результаты расчетов вполне согласуются с результатами экспериментов [28-30], проведенных в промышленных масштабах. Исследования удаления неметаллических включений проводились при разливке через секционированный промежуточный ковш (приемная и две разливочные секции), продувка аргоном осуществлялась через пористые блоки, закрепленные в нижней части днища промковша. Поток аргона составлял 2-3 м<sup>3</sup>/час; продувка осуществлялась в пузырьковом режиме.

Применение технологии продувки стали аргоном в ПК [30] позволило снизить диапазон общего индекса загрязненности, рассчитанного по ГОСТ 1778 (метод «Л») с  $(0,80...1,65) \times 10^{-3}$  до  $(0,50...1,20) \times 10^{-3}$ . Наибольшее снижение загрязненности достигнуто по количеству оксидов – на 40...60%, по сульфидам снижение составило 15...40%, что вполне соответствует результатам расчета.

### Выводы

1. Сформулирована комбинированная математическая модель флотации и удаления неметаллических частиц для промежуточного ковша слябовой МНЛЗ.
2. Показано, что на выходе ячейки идеального смешения остается сравнительно большая доля крупных неметаллических включений, чем на выходе ячейки идеального вытеснения, рост доли объема ПК с режимом идеального смешения (с ламинарным течением) ведет к снижению остаточной доли неметаллических включений.
3. Расчетным путем установлено, что при продувке аргоном в разливочной секции промежуточного ковша двухручьевого МНЛЗ эффективность флотации зависит от размера неметаллических включений (небольшие включения практически не удаляются) и размера пузырьков газа (небольшие пузырьки газа обеспечивают более высокую скорость удаления неметаллических включений).

### Список использованных источников:

1. Chattopadhyay K. Physical and Mathematical Modelling of Steelmaking Tundish Operations: A Review of the Last Decade (1999-2009) / K. Chattopadhyay, M. Isac, R. Guthrie // ISIJ International. – 2010. – Vol. 50. – № 3. – Pp. 331-348.
2. Sahai Y. Tundish Technology For Clean Steel Production / Y. Sahai, T. Emi. – Singapore : World Scientific Publishing Company, 2008. – 316 p.
3. Warzecha M. CFD modeling of non-metallic inclusions removal process in the T-type tundish /



- M. Warzecha, T. Merder, P. Warzecha // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. – 2012. – Vol. 55. – Issue 2. – Pp. 590-595.
4. Modeling the effects of a swirling flow on temperature stratification of liquid steel and flotation of inclusions in a tundish / G. Solorio-Diaz [et al.] // *ISIJ International*. – 2005. – Vol. 45. – № 8. – Pp. 1129-1137.
  5. Melt flow control in a multistrand tundish using a turbulence inhibitor / R.D. Morales [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2000. – Vol. 31. – № 6. – Pp. 1505-1515.
  6. Modeling study of the influence of turbulence inhibitors on the molten steel flow, tracer dispersion, and inclusion trajectories in tundishes / S. López-Ramirez [et al.] // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2001. – Vol. 32. – № 4. – Pp. 615-627.
  7. Mouttez B. Numerical investigation of the fluid flow in continuous casting tundish using analysis of RTD curves / B. Mouttez, A. Bellaouar, K. Talbi // *Journal of Iron and Steel Research International*. – 2009. – Vol. 16. – № 2. – Pp. 22-29.
  8. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers / L. Zhong [et al.] // *ISIJ International*. – 2007. – Vol. 47. – № 1. – Pp. 88-94.
  9. Braun A. Numerical and physical modeling of steel flow in a two-strand tundish for different casting conditions / A. Braun, M. Warzecha, H. Pfeifer // *Metallurgical and Materials Transactions B*. – 2010. – Vol. 41. – № 3. – Pp. 549-559.
  10. Merder T. Numerical modeling of the influence subflux controller of turbulence on steel flow in the tundish / T. Merder, J. Pieprzyca // *Metallurgija*. – 2011. – Vol. 50. – № 4. – Pp. 223-226.
  11. Warzecha M. Numerical analysis of the non-metallic inclusions distribution and separation in a two-strand tundish / M. Warzecha, T. Merder // *Metallurgija*. – 2013. – Vol. 52. – № 2. – Pp. 153-156.
  12. Jha P.K. Effect of outlet positions and various turbulence models on mixing in a single and multi strand tundish / P.K. Jha, S.K. Dash // *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*. – 2002. – Vol. 12. – № 5. – Pp. 560-584.
  13. Kumar A. An assessment of fluid flow modelling and residence time distribution phenomena in steelmaking tundish systems / A. Kumar, S.C. Korla, D. Mazumdar // *ISIJ International*. – 2004. – Vol. 44. – № 8. – Pp. 1334-1341.
  14. Merder T. Effect of casting flow rate on steel flow phenomena in tundish / T. Merder // *Metallurgija*. – 2013. – Vol. 52. – № 2. – Pp. 161-164.
  15. Sahai Y. Melt flow characterization in continuous casting tundishes / Y. Sahai, T. Emi // *ISIJ International*. – 1996. – Vol. 36. – № 6. – Pp. 667-672.
  16. Seshadri V. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain / V. Seshadri, C.A. da Silva, I.A. da Silva // *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*. – 2012. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 22-29.
  17. Inclusion separation in tundishes – some new general aspects / M. Javurek [et al.] // *Steel Research*. – 2002. – Vol. 73. – № 5. – Pp. 1-9.
  18. Chattopadhyay K. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud misalignment on Liquid Metal Quality in a Tundish / K. Chattopadhyay, M. Isac, R.I.L. Guthrie // *ISIJ International*. – 2011. – Vol. 51. – № 5. – Pp. 759-768.
  19. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottom-blowing in continuous casting tundish / Z. Meijie [et al.] // *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*. – 2011. – Vol. 47. – Issue 2. – Pp. 137-147.
  20. Mouttez B. Numerical Investigation of the Fluid Flow in Continuous Casting Tundish Using Analysis of RTD Curves / B. Mouttez, A. Bellaouar, K. Talbi // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2009. – Vol. 16. – Issue 2. – № 3. – Pp. 22-29.
  21. Mazumdar D. Physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems / D. Mazumdar, R.I.L. Guthrie // *ISIJ International*. – 1999. – Vol. 39. – № 6. – Pp. 524-547.
  22. Samoilovich Yu.A. Mass transfer in intermediate ladles of continuous-casting machine / Yu.A. Samoilovich // *Steel in translation*. – 2010. – Vol. 40. – № 2. – Pp. 134-140.
  23. Моделирование современных процессов внепечной обработки и непрерывной разливки стали / О.Б. Исаев [и др.]. – М. : Metallurgizdat, 2008. – 373 с.
  24. Wang L.T. Prediction of the optimum bubble size for inclusion removal from molten steel by flotation / L.T. Wang, H.-G. Lee, P. Hayes // *ISIJ International*. – 1996. – Vol. 36. – № 1. – Pp. 7-16.
  25. Wang L.T. Mathematical model for growth and removal of inclusion in a multi-tuyere ladle during

- gas-stirring / L.T. Wang // *ISIJ International*. – 2005. – Vol. 31. – № 3. – Pp. 331-337.
26. Дерягин Б.В. Микрофлотация: водоочистка, обогащение / Б.В. Дерягин, С.С. Духин, Н.Н. Рулев. – М. : Химия, 1986. – 112 с.
  27. Пенная сепарация и колонная флотация / Ю.Б. Рубинштейн [и др.]. – М. : Недра, 1989. – 303 с.
  28. Кислица В.В. Совершенствование и внедрение комплексной технологии рафинирования стали в промежуточных кошах МНЛЗ / В.В. Кислица, Е.А. Чичкарев, О.Б. Исаев // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2009. – № 2. – С. 17-21.
  29. Пат. 43121 Україна, МПК В 22 D 11/00, С 21 В 3/04. Змінна вогнетривка перегородка для рафінування сталі в проміжних ковшах МБРС / В.В. Кислиця, Є.П. Діюк, Б.С. Гончар, О.Б. Ковура, О.Б. Ісаєв, І.В. Ганошенко, М.А. Вожол. – № u200813197; заявл. 14.11.08; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.
  30. Кислица В.В. Совершенствование процессов удаления неметаллических включений в трубных сталях за счет управления гидродинамическими потоками жидкого металла в промежуточном ковше МНЛЗ : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02 / Кислица Вячеслав Владимирович. – М., 2009. – 194 с.

#### References:

1. Chattopadhyay K., Isac M., Guthrie R. Physical and Mathematical Modelling of Steelmaking Tundish Operations: A Review of the Last Decade (1999-2009). *ISIJ International*, 2010, vol. 50, no.3, pp. 331-348.
2. Sahai Y., Emi T. Tundish Technology For Clean Steel Production. Singapore, World Scientific Publishing Company, 2008, 316 p.
3. Warzecha M., Merder T., Warzecha P. CFD modeling of non-metallic inclusions removal process in the T-type tundish. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2012, vol. 55, iss. 2, pp. 590-595.
4. Solorio-Diaz G., Morales R.D., Palafox-Ramos J., Ramos-Banderas A. Modeling the effects of a swirling flow on temperature stratification of liquid steel and flotation of inclusions in a tundish. *ISIJ International*, 2005, vol. 45, no.8, pp. 1129-1137.
5. Morales R.D., Palafox-Ramos J., Barreto J. de J., Lopez-Ramirez S., Zacharias D. Melt flow control in a multistrand tundish using a turbulence inhibitor. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2000, vol. 31, no.6, pp. 1505-1515.
6. López-Ramirez S., Palafox-Ramos J., Morales R.D., Barreto J. de J., Zacharias D. Modeling study of the influence of turbulence inhibitors on the molten steel flow, tracer dispersion, and inclusion trajectories in tundishes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001, vol. 32, no.4, pp. 615-627.
7. Moumtez B., Bellaouar A., Talbi K. Numerical investigation of the fluid flow in continuous casting tundish using analysis of RTD curves. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2009, vol. 16, no.2, pp. 22-29.
8. Zhong L., Li B., Zhu Yi., Wang R., Wang W., Zhang X. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers. *ISIJ International*, 2007, vol. 47, no.1, pp. 88-94.
9. Braun A., Warzecha M., Pfeifer H. Numerical and physical modeling of steel flow in a two-strand tundish for different casting conditions. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2010, vol. 41, no.3, pp. 549-559.
10. Merder T., Pieprzyca J. Numerical modeling of the influence subflux controller of turbulence on steel flow in the tundish. *Metallurgija*, 2011, vol. 50, no.4, pp. 223-226.
11. Warzecha M., Merder T. Numerical analysis of the non-metallic inclusions distribution and separation in a two-strand tundish. *Metallurgija*, 2013, vol. 52, no.2, pp. 153-156.
12. Jha P.K., Dash S.K. Effect of outlet positions and various turbulence models on mixing in a single and multi strand tundish. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow*, 2002, vol. 12, no.5, pp. 560-584.
13. Kumar A., Koria S.C., Mazumdar D. An assessment of fluid flow modelling and residence time distribution phenomena in steelmaking tundish systems. *ISIJ International*, 2004, vol. 44, no.8,

- pp. 1334-1341.
14. Merder T. Effect of casting flow rate on steel flow phenomena in tundish. *Metalurgija*, 2013, vol. 52, no.2, pp. 161-164.
  15. Sahai Y., Emi T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. *ISIJ International*, 1996, vol. 36, no.6, pp. 667-672.
  16. Seshadri V., da Silva C.A., da Silva I.A.. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2012, vol. 9, no.1, pp. 22-29.
  17. Javurek M., Kaufmann B., Zuba G., Gittler P. Inclusion separation in tundishes – some new general aspects. *Steel Research*, 2002, vol. 73, no.5, pp. 1-9.
  18. Chattopadhyay K., Isac M., Guthrie R.I.L. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud mis-alignment on Liquid Metal Quality in a Tundish. *ISIJ International*, 2011, vol. 51, no.5, pp. 759-768.
  19. Meijie Z., Huazhi G., Hongxi Z., Chengji D. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottom-blowing in continuous casting tundish. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 2011, vol. 47, iss. 2, pp. 137-147.
  20. Moumtez B., Bellaouar A., Talbi K. Numerical Investigation of the Fluid Flow in Continuous Casting Tundish Using Analysis of RTD Curves. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2009, vol. 16, iss. 2, no.3, pp. 22-29.
  21. Mazumdar D., Guthrie R.I.L. Physical and mathematical modelling of continuous casting tundish systems. *ISIJ International*, 1999, vol. 39, no.6, pp. 524-547.
  22. Samoilovich Yu.A. Mass transfer in intermediate ladles of continuous-casting machine. *Steel in translation*, 2010, vol. 40, no.2, pp. 134-140.
  23. Isayev O.B. *Modelirovaniye sovremennykh protsessov vneprechnoy obrabotki i nepreryvnoy razlivki stali* [Modeling of modern processes of extra oven processing and continuous pouring of steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 2008. 373 p. (Rus.)
  24. Wang L.T., Lee H.-G., Hayes P. Prediction of the optimum bubble size for inclusion removal from molten steel by flotation. *ISIJ International*, 1996, vol. 36, no.1, pp. 7-16.
  25. Wang L.T. Mathematical model for growth and removal of inclusion in a multi-tuyere ladle during gas-stirring. *ISIJ International*, 2005, vol. 31, no.3, pp. 331-337.
  26. Deryagin B.V., Derjagin B.V., Duhin S.S., Rulev N.N. *Mikroflotatsiya: vodoochistka, obogashcheniye* [Microflotation: water purification, enrichment]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 112 p. (Rus.)
  27. Rubinshtejn Ju.B., Melik-Gajkazjan V.I., Matveenko N.V., Leonov S.B. *Pennaya separatsiya i kolonnaya flotatsiya* [Foamy separation and columned flotation]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 303 p. (Rus.)
  28. Kislitsa V.V., Chichkarev E.A., Isaev O.B. *Sovershenstvovaniye i vnedreniye kompleksnoy tekhnologii rafinirovaniya stali v promezhutochnykh koshakh MNLZ* [Improvement and implementation of integrated refining technology for steel in intermediate caster CCM]. *Bulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii «Chernaia metallurgiya» – Bulletin of scientific and technical and economic information «Ferrous Metallurgy»*, 2009, № 2, pp. 17-21. (Rus.)
  29. Kyslytsya V.V., Dijuk Є.P., Gonchar B.S., Kovura O.B., Isaev O.B., Ganoshenko I.V., Vozhol M.A. *Zminna vohnetryvka perehorodka dlya rafinuvannya stali v promizhnykh kovshakh MBRS* [Variable refractory partition for steel refining in the intermediate caster CCM]. Patent UA, no.43121, 2009. (Ukr.)
  30. Kislitsa V.V. *Sovershenstvovaniye protsessov udaleniya nemetallicheskih vklyucheniy v trubnykh stalyakh za schet upravleniya gidrodinamicheskimi potokami zhidkogo metalla v promezhutochnom kovshe MNLZ*. Diss. kand. tekhn. nauk [Perfection of processes of removal of nonmetallic inclusions in pipe steels at the expense of management of hydrodynamic streams of liquid metal in an intermediate caster CCM. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 194 p. (Rus.)

Рецензент: С.Л. Макуров  
д-р техн. наук, проф., ГБУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 10.09.2017