МЕТАЛЛУРГИЯ

УДК 669.18.046.516:519.876:621.746.5 EDN: LPRWTR

Куберский С. В.
Донбасский государственный технический университет
E-mail: Skuberskiy@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ РАСЧЕТА КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО КОВША И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Предложена гидравлическая модель расчета конструктивных параметров промежуточного ковша и технологических режимов электромагнитной обработки стали. Проведена верификация модели с использованием результатов физического моделирования процесса электромагнитного перемешивания расплава Вуда и подтверждена ее адекватность. Определены прогнозные размеры промежуточного ковша объемом 1 м^3 и параметры электромагнитного перемешивания стали в нем для обеспечения заданных скоростей потоков, способствующих эффективной гомогенизации расплава и удалению неметаллических включений. Показаны пути дальнейшего усовершенствования модели.

Ключевые слова: *непрерывная разливка, сталь, качество, моделирование, электромагнитное перемешивание, промежуточный ковш, усреднение, рафинирование, параметры обработки.*

Качество и свойства металлопродукции в значительной степени определяют продолжительность ее жизненного цикла и зависят от однородности структуры и химического состава стали, а также от содержания в ней неметаллических включений (НВ). Важное место в производстве непрерывнолитого металла высокого качества занимает промежуточный ковш (ПК), конструкция и геометрия которого могут обеспечить повышение эффективности обработки за счет организации управляемых по направлению и скорости потоков стали к дозирующим устройствам [1–4].

Перспективным направлением обработки стали в ПК является ее электромагнитное перемешивание (ЭМП), способствующее гомогенизации температуры и химического состава, снижению застойных зон и повышению чистоты стали по НВ. Эффективность рафинирования от НВ повышается в результате их всплывания в покровный шлак при увеличении времени пребывания стали в ПК и укрупнения за счет интенсификации столкновений при управляемой гидродинамике [5–8].

Одним из эффективных направлений поиска оптимальных путей повышения качества стали является физическое и численное моделирование для оптимизации технологических режимов непрерывной разливки.

С помощью физического моделирования можно визуально оценить влияние ЭМП стали в ПК на процессы движения расплава, а численная модель позволяет прогнозировать оптимальные технологические параметры, обеспечивающие эффективную гомогенизацию стали и рафинирование ее от НВ [9–11].

Несмотря на проблемы с точностью задания условий расчета, соответствующих реалиям производственной практики, имеются публикации об успешном применении, в частности, ANSYS для анализа и последующего совершенствования режима непрерывной разливки стали [10, 12–14].

Предпочтительным является совместное использование физического и численного моделирования для оптимизации технологии ЭМП стали в ПК [4, 15].

В работе [16] была предложена упрощенная балансовая модель для определения параметров ЭМП стали в ПК. Однако она содержала ряд достаточно грубых допущений, а также использовала табличные

значения коэффициентов при расчете потерь энергии. Поэтому разработка новой методики, основанной на определении необходимого силового электромагнитного воздействия (СЭМВ) на расплав, обеспечивающего требуемую скорость движения потока с учетом реальной гидродинамической обстановки на отдельных участках ПК, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы — усовершенствование упрощенной модели для повышения точности прогнозирования технологических параметров электромагнитной обработки стали в ПК различной вместимости.

Сущность усовершенствования заключается в следующем:

– определение каждого члена баланса: потери на трение на всех участках, местные потери (сужение, расширение, повороты 90º и 180º), приход от силы Ампера и кинетическая энергия возвратного потока; все потери выражаются через геометрические параметры и скорость на выходе из АЗ с учетом неразрывности потока;

– определение коэффициента расхода (φ) численно вместе с СЭМВ (X) из условия баланса через замкнутую систему уравнений; это исключает необходимость в дополнительных эмпирических данных (при условии, что задано повышение уровня расплава в миксерной зоне (МЗ) ПК ($\Delta h_{МЗ}$));

– учет всех характерных размеров: переливные каналы (нижняя и верхняя щели), сечения МЗ и АЗ, длины участков, смоченные периметры, эквивалентные диаметры; это позволяет рассчитать потери индивидуально для каждого участка;

– использование в качестве целевого параметра $\Delta h_{МЗ}$; по нему, решая систему, определяют φ и X, а затем все скорости и потери; это делает модель инструментом проектирования;

– оценка инерционности процесса для обоснования возможности использования стационарной гидравлической модели.

Для верификации новой модели использовалось сравнение полученных результатов с результатами физического моделирования ЭМП расплава Вуда при температуре 90 ºС.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие ***задачи***:

– уточнить схему потоков, возникающих в ПК при воздействии на расплав АЗ скрещенных электрического и магнитного полей;

– усовершенствовать упрощенную модель расчета электрических параметров ЭМП и скоростей образующихся потоков расплава в ПК;

– определить численные параметры электромагнитной обработки расплава Вуда и сравнить их с результатами физического моделирования;

– предложить прогнозные параметры электромагнитной обработки стали в ПК заданного объема.

Объект исследования — промежуточный ковш МНЛЗ, оборудованный кондукционным электромагнитным перемешивателем.

Предмет исследования — характер потоков жидкости, образующихся в ПК при воздействии на нее электромагнитного поля различной интенсивности.

Основными методами, используемыми в работе, были физическое и численное моделирование.

Физическая и численная модели представляют собой двухзонный ПК (АЗ и МЗ), заполненный расплавом или раствором. АЗ модели размещается в зазоре электромагнита, и на электроды, расположенные на противоположных концах АЗ по ее длине ($L_{АЗ}$, м) по всей глубине (H_0), подается постоянный ток. При взаимодействии магнитного поля (B, Тл, (кг/(А·с^2)) и электрического тока ($I_{эл}$, А) возникает сила Ампера ($F_{эм}$, Н, (кг·м/с^2)), направленная вертикально вниз:

$$F_{эм} = B \cdot I_{эл} \cdot L_{АЗ}. \qquad (1)$$

Эта сила создает электромагнитное утяжеление g_e (м/с^2) (кажущееся ускорение свободного падения), которое действует на расплав в АЗ:

$$g_e = \frac{F_{эм}}{m} = \frac{B \cdot I_{эл} \cdot L_{АЗ}}{b_{АЗ} \cdot H_0 \cdot L_{АЗ} \cdot \rho} = \frac{B \cdot I_{эл}}{b_{АЗ} \cdot H_0 \cdot \rho}, \quad (2)$$

где $m = \rho \cdot b_{АЗ} \cdot H_0 \cdot L_{АЗ}$ — масса обрабатываемой жидкости в АЗ, кг;

ρ — плотность, кг/м^3;

H_0 — высота налива в АЗ, м.

Кажущееся ускорение g_e здесь рассматривается как усредненная по объему АЗ добавка к ускорению свободного падения, обеспечивающая глобальный баланс импульса. Суммарная электромагнитная сила $F_{эм}$ распределяется по всему объему расплава в АЗ. Воздействие считается равномерно распределенным вдоль оси тока, поэтому при расчете напора используется полная длина $L_{АЗ}$.

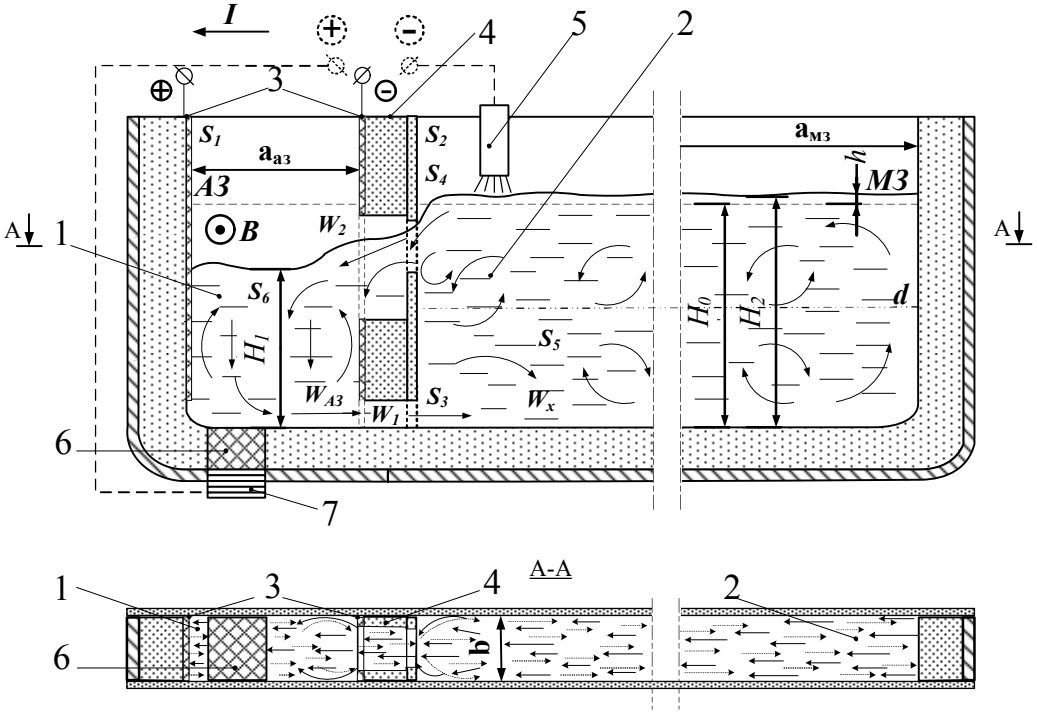
Под действием g_e уровень в АЗ понижается до H_1, а в МЗ повышается до H_2 в соответствии с отношением площадей зеркал АЗ (S_1) и МЗ (S_2):

$$\Delta h_{АЗ} = \Delta h_{МЗ} \cdot \frac{S_2}{S_1}, \; H_1 = H_0 - \Delta h_{АЗ}, \quad (3)$$
$$H_2 = H_0 + \Delta h_{МЗ}.$$

Возникший перепад уровней инициирует циркуляцию МС между зонами (рис. 1).

Расчет площадей сечения, зеркал АЗ (S_1) и МЗ (S_2), нижней (S_3) и верхней (S_4) щелей, боковых стенок и дна в МЗ ($S_{5бок}$), торцевой стенки ($S_{торц}$) и нисходящего потока в АЗ (S_6) проводили по формулам:

$$S_1 = L_{АЗ} \cdot b_{АЗ}, \; S_2 = L_{МЗ} \cdot b_{МЗ},$$
$$S_3 = h_1 \cdot b_1, \; S_4 = h_2 \cdot b_2,$$
$$S_5 = b_{МЗ} \cdot H_2, \; S_6 = b_{АЗ} \cdot H_1, \quad (4)$$
$$S_{торц} = b_{мз} \cdot H_2,$$
$$S_{5бок} = (b_{мз} + 2 \cdot H_2) \cdot L_{МЗ}.$$



1 — активная зона (АЗ); 2 — миксерная зона (МЗ);
3 — электроды в АЗ; 4 — перегородка с нижним и верхним переливными каналами;
5 — верхний электрод; 6 — электропроводный огнеупор;
7 — токосъемник (пунктир — возможная схема подключения)

Рисунок 1 — Схема ПК МНЛЗ с ЭМП

Скорости потоков на различных участках модели (средняя в МЗ (W_X), в верхнем канале (W_2) и в АЗ ($W_{АЗ}$)) определяли по скорости W_1 (на выходе из нижнего канала) из условия неразрывности. Такой подход соответствует стационарному характеру процесса и исключает необходимость учета объемного расхода, связанного с изменением уровня. После создания СЭМВ расплав приходит в движение не мгновенно. Требуется время, чтобы:

– установились скорости;

– уровень в МЗ поднялся до стационарного значения;

– установился баланс между приходом и потерями.

Модель стационарная — описывает установившийся режим, когда параметры (уровни, скорости, потери) перестают меняться во времени. Поэтому параметры определялись после стабилизации уровня.

Время стабилизации в условиях небольших объема и скоростей составляло доли секунды, что гораздо меньше длительности эксперимента (обработки в ПК в реальных условиях), и динамикой можно пренебречь, а измеряемая $\Delta h_{МЗ}$ соответствует равновесному значению для текущих $I_{эл}$ и В. Экспериментально наблюдаемая синхронность изменения уровня с ручным изменением тока подтверждает, что задержка определяется исключительно скоростью изменения тока, а не гидравлической инерцией системы.

Скорость потока в нижней щели W_1 определяется из баланса энергий в установившемся режиме циркуляции. Она выражается через коэффициент расхода φ, определяемый из баланса энергий, и электромагнитное ускорение g_e:

$$W_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g_e \cdot H_1}. \qquad (5)$$

Под действием g_e и перепада уровней жидкость в АЗ начинает двигаться вертикально вниз со скоростью $W_{АЗ}$:

$$W_{АЗ} = W_1 \cdot \frac{S_3}{S_6}. \qquad (6)$$

Поток достигает дна АЗ, поворачивает на 90º и меняет вертикальное направление на горизонтальное. Коэффициенты местных потерь на повороты ($\zeta_{пов}$) принимались равными 1,2 при повороте на 90º и 2 при повороте на 180º [17]. Потери на этот поворот составят

$$\Delta P_{пов1} = 1,2 \cdot \left(\frac{\rho W_{АЗ}^2}{2} \right). \qquad (7)$$

Горизонтальный поток входит в нижнюю щель (S_3), где его скорость возрастает до W_1.

Коэффициенты местных потерь на сужение и расширение определялись по формулам Борда — Идельчика [18]:

$$\zeta_{расш} = \left(1 - \frac{S_{мал}}{S_{бол}} \right)^2, \quad \zeta_{сужс} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_{мал}}{S_{бол}} \right), \qquad (8)$$

где $S_{мал}$ и $S_{бол}$ — площади малого и большого сечений.

Потери на сужение при входе в нижнюю щель:

$$\zeta_{суж.н} = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_3}{S_6} \right), \quad \Delta P_{суж.н} = \zeta_{суж.н} \cdot \frac{\rho \cdot W_1^2}{2}. \qquad (9)$$

Поток выходит из нижней щели в МЗ со скоростью W_1. В МЗ он расширяется до полного сечения S_5, где его скорость становится

$$W_x = W_1 \cdot \frac{S_3}{S_5}. \qquad (10)$$

Потери на расширение:

$$\zeta_{расш.н} = \left(1 - \frac{S_3}{S_5} \right)^2, \quad \Delta P_{расш.н} = \zeta_{расш.н} \cdot \frac{\rho \cdot W_1^2}{2}. \qquad (11)$$

В МЗ формируется единый макропоток, который движется вдоль дна к торцевой стенке. Поток ударяется о торцевую стенку МЗ и разворачивается на 180º, меняя направление на противоположное. Потери давления (ΔР) на этом повороте при $\zeta = 2{,}0$ (для резкого разворота на 180º) составят

$$\Delta P_{пов\,2} = 2 \cdot \left(\frac{\rho W_x^2}{2} \right). \qquad (12)$$

Поток движется обратно к верхней щели (S_4) со скоростью W_x, а при входе в нее его скорость возрастает до W_2:

$$W_2 = W_1 \cdot \frac{S_3}{S_4}. \qquad (13)$$

Потери на сужение для этого участка определяются по соотношениям

$$\zeta_{суж.в} = 0{,}5 \cdot \left(1 - \frac{S_4}{S_5} \right), \qquad \Delta P_{суж.в} = \zeta_{суж.в} \cdot \frac{\rho \cdot W_2^2}{2}. \qquad (14)$$

На этом участке поток испытывает трение о дно и боковые стенки.

Поток выходит из верхней щели горизонтально со скоростью W_2 и попадает в АЗ, где уровень понижен ($H_1 < H_0$). Под действием силы тяжести и g_e поток разворачивается на 90º вниз, что приводит к потерям на третьем повороте:

$$\Delta P_{пов\,3} = 1{,}2 \cdot \left(\frac{\rho W_2^2}{2} \right). \qquad (15)$$

После разворота поток падает вертикально вниз и сливается с нисходящим потоком, уже существовавшим в АЗ. Их расходы суммируются, и через сечение АЗ (S_6) проходит полный расход МС (Q).

При выходе из верхней щели в АЗ поток расширяется от сечения S_4 до S_6:

$$\zeta_{расш.в} = \left(1 - \frac{S_4}{S_6} \right)^2, \qquad \Delta P_{расш.в} = \zeta_{расш.в} \cdot \frac{\rho \cdot W_2^2}{2}. \qquad (16)$$

При движении потока через верхнюю и нижнюю щели, в МЗ и АЗ, а также при скольжении его по торцевой стенке после разворота на 180º возникают потери на трение, рассчитываемые по формуле Дарси — Вейсбаха [19]:

$$\Delta P_{тр} = \lambda \cdot \frac{L}{D_э} \cdot \frac{\rho \cdot W^2}{2}. \qquad (17)$$

где $\Delta P_{тр}$ — потери давления на трение, Па;

λ — коэффициент гидравлического трения (безразмерный);

L — длина участка, м;

$D_э$ — эквивалентный (гидравлический) диаметр, м;

ρ — плотность жидкости, кг/м^3;

W — средняя скорость потока на участке, м/с.

Характерные параметры участков трения потока представлены в таблице 1.

Коэффициенты трения для участков различной длины и характера течения потока рассчитывали с учетом числа Рейнольдса по формулам [20]

$$\lambda_i = \frac{0{,}3164}{R_{e_i}^{0{,}25}}, (Re_i > 2300, \text{турб.}) \text{ и } \lambda_i = \frac{64}{Re_i}, (Re_i \le 2300, \text{лам.}). \qquad (18)$$

$$Re_i = \frac{W_i \cdot D_{э,i}}{\nu}, \qquad (19)$$

где Re — число Рейнольдса (безразмерное);

W — средняя скорость потока на участке, м/с;

$D_э$ — эквивалентный диаметр, м;

ν — кинематическая вязкость жидкости, м^2/с.

Критерий Рейнольдса для различных участков (нижняя щель, верхняя щель, поток в МЗ и АЗ, торцевая стенка) определяется из соотношений

$$Re_3 = \frac{W_1 \cdot D_3}{\nu},\ Re_4 = \frac{W_2 \cdot D_4}{\nu},$$

$$Re_5 = \frac{W_x \cdot D_{5бок}}{\nu},\ Re_6 = \frac{W_{АЗ} \cdot D_э^6}{\nu}, \quad (20)$$

$$Re_{торц} = \frac{W_x \cdot D_{торц}}{\nu}.$$

Эквивалентные диаметры рассчитывали по формуле:

$$D_э = \frac{4S}{П} = \frac{2h \cdot b}{h + b}, \quad (21)$$

где S — площадь живого сечения, м^2;

$П$ — смоченный периметр, м.

Расчет смоченного периметра и эквивалентных диаметров для нижней (D_3) и верхней (D_4) щелей, боковых стенок и дна в МЗ ($D_{5бок}$), торцевой стенки ($D_{торц}$) и АЗ (D_6) проводили по формулам:

$$П_3 = 2(h_1 + b_1),\ П_4 = 2(h_2 + b_2),$$

$$П_5 = b_{МЗ} + 2H_2,\ П_6 = 2(H_1 + b_{АЗ}), \quad (22)$$

$$П_{торц} = 2H_2 + b_{МЗ},$$

$$D_3 = \frac{2h_1 b_1}{h_1 + b_1},\ D_4 = \frac{2h_2 b_2}{h_2 + b_2},$$

$$D_{5бок} = \frac{4H_2 b_{МЗ}}{b_{МЗ} + 2H_2},\ D_6 = \frac{2H_1 b_{АЗ}}{H_1 + b_{АЗ}}, \quad (23)$$

$$D_{торц} = \frac{4H_2 b_{МЗ}}{2H_2 + b_{МЗ}}.$$

Суммарные потери на трение (в АЗ, щелях, МЗ — о торцевую стенку, боковые стенки и дно) составят:

$$\Delta P_{тр} = \lambda_3 \frac{l_1}{D_3}\frac{\rho W_1^2}{2} + \lambda_4 \frac{l_2}{D_4}\frac{\rho W_2^2}{2} +$$

$$+\lambda_5 \frac{L_{МЗ}}{D_{5бок}}\frac{\rho W_x^2}{2} + \lambda_6 \frac{H_1}{D_6}\frac{\rho W_{АЗ}^2}{2} + \quad (24)$$

$$+\lambda_{торц} \frac{H_2}{D_{торц}}\frac{\rho W_x^2}{2}.$$

Суммарные потери составят:

$$\Delta P_{сум} = \Delta P_{пов1} + \Delta P_{пов2} +$$

$$+\Delta P_{пов3} + \Delta P_{сужд.в} + \Delta P_{сужд.н} + \quad (25)$$

$$+\Delta P_{расш.в} + \Delta P_{расш.н} + \Delta P_{тр}.$$

Приход энергии складывается из работы силы Ампера и кинетической энергии возвратного потока (через верхнюю щель):

$$E_{прих} = \frac{X}{b_{АЗ}} \cdot \frac{H_1}{H_0} + \frac{\rho W_2^2}{2}, \quad (26)$$

где $X = B \cdot I_{эл}$ — неизвестное СЭМВ, определяемое из баланса. Физически это произведение магнитной индукции на силу тока. Размерность: Тл·А, что эквивалентно Н/м — сила на единицу длины проводника.

Уравнение баланса:

$$\frac{X}{b_{АЗ}} \cdot \frac{H_1}{H_0} + \frac{\rho W_2^2}{2} = \Delta P_{сум}. \quad (27)$$

Скорости с X связаны уравнением

$$W_1 = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{X}{\rho \cdot b_{АЗ} \cdot H_0} \cdot H_1}. \quad (28)$$

Таблица 1

Параметры участков трения потока

Участок	Поверхности трения	Длина L	S контакта	λ_i	$D_э$	Скорость
Нижняя щель	Стенки канала	l_1	$2(h_1+b_1)\cdot l_1$	λ_3	D_3	W_1
Верхняя щель		l_2	$2(h_2+b_2)\cdot l_2$	λ_4	D_4	W_2
АЗ (вертикаль)		$L_6=H_1$	$2(b_{АЗ}+H_1)\cdot H_1$	λ_6	D_6	$W_{АЗ}$
МЗ	Дно и 2 боковые стенки	$L_{МЗ}$	$(b_{МЗ}+2H_2)\cdot L_{МЗ}$	λ_5	$D_{5бок}$	W_x
Торцевая стенка	Плоскость контакта	$L_{торц}=H_2$	$b_{МЗ}\cdot H_2$	$\lambda_{торц}$	$D_{торц}$	W_x

Получаем систему из двух уравнений (27 и 28) с двумя неизвестными φ и X (если задано $\Delta h_{МЗ}$). Все потери выражены через W_1, которая связана с φ и X. Баланс связывает X и φ. Система решается численно (подбор φ и X до сходимости баланса). Задается $\Delta h_{МЗ}$, решается система для определения φ и $X = I_{эл} \cdot B$, затем рассчитываются все скорости и потери. Для определения $I_{эл}$ задается индукция магнитного поля используемого электромагнита.

По данной методике можно определить СЭМВ, необходимое для создания потоков расплава (раствора) требуемой интенсивности. Целевым параметром в модели является $\Delta h_{МЗ}$ — изменение уровня расплава (раствора) в МЗ, которое задается и определяет значения искомых величин.

Основные допущения — квазистационарность, одномерность, формула Блазиуса для λ, справочные коэффициенты ζ для поворотов. Режим течения — установившийся (стационарный). Время установления уровня определяется скоростью распространения давления в жидкости и составляет $10^{-4} \div 10^{-3}$ с, что на несколько порядков меньше времени изменения управляющих параметров (токов) [18]. Жидкость — несжимаемая ($\rho = const$). Индукция магнитного поля однородна в пределах АЗ. Ток распределен равномерно по глубине АЗ. Сила Лоренца не учитывается. Трение о свободную поверхность (воздух) не учитывается. Удар потока о дно АЗ не учитывается отдельно в потерях на трение, так как это влияние полностью учтено в коэффициенте местного сопротивления ($\zeta = 1{,}2$) при повороте перед выходом в МЗ. Торцевая стенка МЗ, о которую поток ударяется и скользит при развороте на 180º, учитывается отдельно как участок трения. Влияние самой преграды (удар о торцевую стенку) учтено в коэффициенте местного сопротивления $\zeta_{180} = 2{,}0$.

Неучтенные эффекты (гидравлическая модель): сила Лоренца, неравномерность распределения тока и вертикальное перемещение при повышении уровня в МЗ.

Выходные параметры: φ — коэффициент расхода, $X = B \cdot I_{эл}$ — СЭМВ, А·Тл, $I_{эл} = X/B$ — ток на электродах, А, W_1, W_x, W_2, $W_{АЗ}$ — скорости потоков, м/с, $\Delta P_{пов}$, $\Delta P_{суж/расш}$, $\Delta P_{тр}$ — потери, Па.

Поскольку определение основных параметров модели производится с использованием метода итераций (последовательного приближения), требующего затрат достаточно большого количества времени, для расчета были использованы Microsoft Excel (программа для работы с электронными таблицами) и макрос в Excel (записанная последовательность действий, которую можно воспроизвести одним нажатием кнопки, горячей клавиши или через меню). По сути, это мини-программа, которая автоматизирует сложные расчеты.

Электронная таблица представляет собой гидравлическую модель двухзонного ПК, позволяющую рассчитать скорости циркуляции металла (W_1, W_2, W_x, $W_{аз}$), потери давления и проверить баланс давлений при заданных геометрических и режимных параметрах.

Макрос предназначен для автоматизированного подбора режимных параметров (коэффициента расхода φ и обобщенной силы Ампера X) двухзонного ПК, обеспечивающих максимально возможную скорость циркуляции металла в миксерной зоне W_x при выполнении условий баланса давлений.

Макрос реализует численный перебор в пространстве двух управляемых параметров:

– внешний цикл — по $\Delta h_{МЗ}$: от 0,001 до 0,006 м с шагом 0,001 м. Для каждого уровня задается диапазон X, пропорциональный уровню ($X_{min} = \Delta h_{МЗ} \cdot 10^6 - 1000$, $X_{max} = \Delta h_{МЗ} \cdot 10^6$), что отражает физическую связь между силовым воздействием и перепадом уровня;

– внутренние циклы — по X и φ;

– X перебирается от X_{max} к X_{min} с шагом 10 Тл·А (поиск от max значения вниз);

– φ перебирается от 0,609 до 0,620 с шагом 0,00001.

Excel-расчет представляет собой гидравлическую модель, на основе которой работает макрос. Модель базируется на уравнении баланса давлений, учитывает потери на трение и местные сопротивления, позволяет рассчитать скорости и проверить невязку.

Совместное использование макроса и Excel-расчета обеспечивает: быстрый поиск режимов; проверку баланса; оценку влияния геометрии и свойств расплава.

Для оценки адекватности методики использовали регрессионную зависимость, полученную при физическом моделировании ЭМП расплава Вуда, имеющую вид

$$\Delta h_{МЗ} = 0,000552 \cdot B \cdot I - 0,000728. \quad (29)$$

Результаты расчетов по упрощенной и новой гидравлическим моделям, а также уравнению (29) представлены в таблице 2 и на рисунке 2. Свойства расплава Вуда при температуре 90 ºС определяли по данным работы [21].

Таблица 2

Сводная таблица значений полученных параметров

$\Delta h_{МЗ}$, м	$X_{эксп}$, Тл·А	$X_{мод}$, Тл·А	W_1, м/с	W_x, м/с	φ	$I_{эл}$, А	B, Тл	$I_{ЭМ}$, А
0,0005	2,22	0,45	0,02910	0,00128	0,5344	5	0,09	8,6
0,0010	3,13	0,90	0,04100	0,00179	0,5432	8	0,113	9,9
0,0015	4,04	1,75	0,05674	0,00246	0,5432	10	0,175	14,5
0,0020	4,94	2,75	0,06944	0,00299	0,5384	12	0,229	20,1
0,0025	5,85	3,80	0,08047	0,00343	0,5391	14	0,271	26,0
0,0030	6,75	4,90	0,09002	0,00381	0,5396	16	0,306	32,1
0,0035	7,66	6,55	0,10250	0,00430	0,5402	18	0,364	45,6
0,0040	8,57	7,65	0,10898	0,00454	0,5406	20	0,383	51,1
0,0045	9,47	8,60	0,11360	0,00470	0,5410	22	0,391	53,8
0,0050	10,38	10,15	0,12127	0,00498	0,5414	24	0,423	65,3
0,0055	11,28	11,15	0,12480	0,00508	0,5418	25	0,446	75,2
0,0060	12,19	12,05	0,12728	0,00514	0,5421	25	0,482	93,6

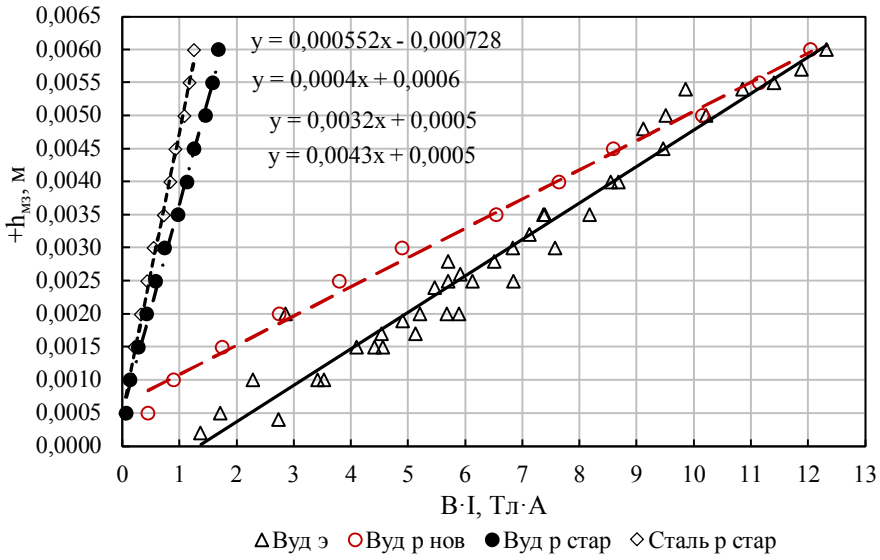


Рисунок 2 — Влияние СЭМВ в АЗ ПК на изменение уровня расплава в МЗ

Представленные данные свидетельствуют о том, что результаты, полученные по новой расчетной модели, в рассмотренном диапазоне находятся значительно ближе к экспериментальным, чем значения, рассчитанные по упрощенной модели определения параметров ЭМП, а при изменении $\Delta h_{мз}$ в диапазоне 0,005–0,006 м они практически совпадают с экспериментальными. Более сильные отклонения расчетных значений в диапазоне $\Delta h_{мз}$ 0,0005–0,003 м можно объяснить сложностью точного измерения повышения уровня при небольших его значениях. Таким образом, можно утверждать, что новая модель является вполне адекватной и может быть использована для прогнозирования технологических параметров ЭМП стали в ПК.

Кроме того, сравнительный анализ показывает, что в диапазоне $\Delta h_{МЗ}$ 0,002–0,006 м значения СЭМВ, рассчитанные по предложенной модели, ниже, чем полученные в ходе эксперимента. Это может быть связано со следующими недостатками модели:

– не учитываются сила Лоренца и неравномерность распределения тока по высоте АЗ;

– заложены осредненные коэффициенты местных потерь.

С использованием новой гидравлической модели были проведены прогнозные расчеты параметров ЭМП стали в ПК, вмещающем 1 м^3 стали (7300 кг), для его размеров, представленных в таблице 3.

Влияние СЭМВ на W_1, W_x и $\Delta h_{мз}$ в таком ковше представлено на рисунке 3.

Данные таблицы 3 и рисунка 3 свидетельствуют о том, что при величине СЭМВ 1000–6000 Тл·А — W_x составляет 0,0067–0,0162 м/с, что обеспечивает 1–3-кратную прокачку всего объема за 1,6–3,9 мин. Такой режим обработки будет способствовать увеличению степени гомогенизации расплава и эффективному его рафинированию от НВ при резидентном времени более 4 мин.

Таблица 3

Конструктивные и технологические параметры ПК с ЭМП

Параметр	Значение
Длина МЗ/АЗ ($a_{пк}$), м	1,5/0,50
Ширина МЗ/АЗ ($b_{пк}$), м	0,7/0,4
Глубина МЗ/АЗ ($l_{пк}$), м	1,0/1,0
Уровень спокойной ванны в МЗ/АЗ (Н), м	0,9/0,9
Длина потока в МЗ ($l_{п.\,мз}$), м	3,9
Высота переливного канала: верхнего ($h_{верх}$), м нижнего ($h_{ниж}$), м	 0,26 0,065
Ширина переливного канала: верхнего ($b_{верх}$), м нижнего ($b_{ниж}$), м	 0,26 0,13
Магнитная индукция (B max), Тл	0,5
Силовое электромагнитное воздействие (СЭМВ) (B·I), Тл·А	1000–6000
Уровень металла при наложении ЭМ поля: АЗ (H_1), м МЗ (H_2), м	 0,897–0,869 0,9005–0,906
Скорость истечения стали из АЗ (W_1), м/с	0,50–1,21
Средняя скорость потоков, создаваемых ЭМП в МЗ (W_x), м/с	0,0067–0,0162
Объемный расход стали из АЗ в МЗ (Q), м^3/с	0,0042–0,0102
Время прокачки всей стали через АЗ ($\tau_{прок}$), мин	1,6–3,9
Кратность циркуляции стали через АЗ ($К_ц$), разы	1–3

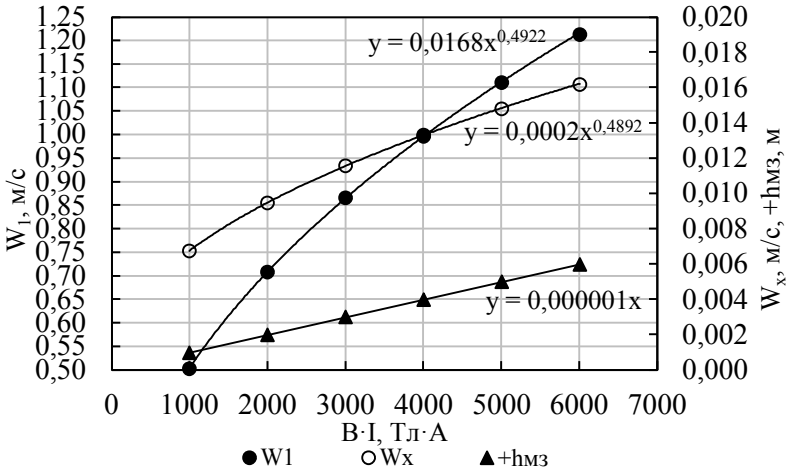


Рисунок 3 — Влияние СЭМВ на изменение W_1, W_x и $\Delta h_{мз}$

Выводы и направления дальнейших исследований:

1. Уточнена схема движения потоков в ПК с ЭМП и усовершенствована численная модель расчета параметров обработки, которая, в отличие от базовой, содержит расчет критериев Рейнольдса, местных потерь и коэффициентов трения, а не использует табличные значения этих параметров, что повышает точность расчета и приближает полученные значения к результатам физического моделирования.

2. Предложены пути для дальнейшего усовершенствования численной модели.

3. Получены зависимости, показывающие влияние СЭМВ на изменение уровня расплава в АЗ и МЗ, а также скорости образующихся циркуляционных потоков.

4. Рекомендованы геометрические размеры основных конструктивных элементов ПК емкостью 1 м^3 (7,3 т) и параметры электромагнитной обработки стали в нем.

В ходе дальнейших исследований предполагается дополнить предложенную в статье численную модель блоками по учету влияния силы Лоренца и неравномерности распределения тока по глубине АЗ (проводника), а также влияния магнитного поля, возникающего в проводнике, что позволит еще больше сблизить результаты численного и физического моделирования.

Список источников

1. Современные промежуточные ковши для высокопроизводительных МНЛЗ / А. Н. Смирнов, А. В. Кравченко, А. П. Верзилов, В. Г. Ефимова // Черная металлургия: бюл. ин-та «Черметинформация». 2012. № 9. С. 19–27. EDN PDBEXX

2. Ефимова В. Г. Анализ рафинирования стали в промежуточном ковше // Сталь. 2020. № 6. С. 17–20. EDN KJQZSH

3. Терентьев Д. В., Точилкин В. В. Развитие технологии процесса разливки стали и совершенствование конструкций оборудования промежуточного ковша сортовой МНЛЗ // Теория и технология металлургического производства. 2020. № 4 (35). С. 25–28. EDN BPFCXK

4. Повышение эффективности рафинирования рельсовой стали в промежуточных ковшах МНЛЗ на основе рациональной организации гидродинамических процессов / Е. В. Протопопов, В. В. Числявлев, М. В. Темлянцев, А. В. Головатенко // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 5. С. 298–304. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304 EDN DURJZB

5. Гидродинамические и физико-химические процессы в промежуточных ковшах для непрерывного литься стали / В. И. Дубоделов [и др.]. К. : Наукова думка, 2018. 263 с.

6. Chen X., Wang P. & Zhang J. Evaluation of the Adaptability of the Dual-Port Channel in Induction Heating Tundish // Metallurgical and Materials Transactions B. 2025. Vol. 56. P. 2437–2452. DOI: 10.1007/s11663-025-03491-1 EDN OPIGYJ

7. Quantitative impacts of induction heating power on refractory erosion and inclusion behaviour in tundishes / M. Hao, Y. Yin, B. Yang, L. Wang // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2026. Vol. 126. No. 5. P. 297–308.

8. Гидродинамическое моделирование и математическое моделирование поля потока и удаления включений в семиручьевом разливочном ковше непрерывного литья с канальным индукционным нагревом / Х. Й. Тан [и др.] // Acta Metallurgica Sinica. 2021. Т. 57. С. 1229–1240.

9. Смирнов А. Н., Смирнов Е. Н., Верзилов А. П. Физическое моделирование циркуляционных потоков и удаления включений в промежуточном ковше с применением вращающегося электромагнитного поля // Черные металлы. 2020. № 7. С. 14–19. EDN BZDPFP

10. Development of next-generation impact pads for producing ultraclean steel using mathematical models and plant trials / T. Bhattacharya [et al.] // AISTech 2016 Proceedings. P. 1547–1572.

11. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottomblowing in continuous casting tundish / Z. Meijie [et al.] // Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy. 2011. Vol. 47. No. 2. P. 137–147.

12. Solhed H., Jonsson L., Jonsson P. Modelling of the steel/slag interface in a continuous casting tundish // Steel Research International. 2008. Vol. 79. No. 5. P. 348–357. DOI: 10.1002/srin.200806137

13. Modeling of bubble behaviors and size distribution in a slab continuous casting mold / Z. Q. Liu, F. S. Qi, B. K. Li, S. C. P. Cheung // International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 79. P. 190–201. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.07.009

14. Кухарев А. Л. Моделирование процессов перемешивания при электровихревых течениях расплава // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2025. № 8 (82). С. 27–35. EDN JMUNFJ

15. Разработка математической модели и численные расчеты гидродинамических потоков стали в промежуточном ковше машины непрерывного литья заготовок / С. В. Фейлер, Е. В. Протопопов, В. П. Комшуков, Л. А. Ганзер // Изв. вузов. Черная металлургия. 2008. № 12. С. 15–21. EDN JXGHJP

16. Куберский С. В. Гидравлический расчет промежуточного ковша МНЛЗ, оборудованного электромагнитным перемешивателем // Сборник научных трудов. 2013. Вып. 40. С. 87–95.

17. Кутателадзе С. С., Боришанский В. М. Справочник по теплопередаче. М. — Л. : Госэнергоиздат, 1959. 414 с.

18. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с

19. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа : учеб. для вузов. 7-е изд., испр. М. : Дрофа, 2003. 840 с.

20. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя : пер. с немецкого. М. : Наука, 1974. 712 с.

21. Экспериментальное исследование электропроводности, плотности и вязкости сплава Вуда / Б. И. Казанджан, В. М. Матвеев, Т. Б. Савич, А. М. Умаров // Теплофизика высоких температур. 1989. Т. 27. № 2. С. 269–273.

© Куберский С. В., 2026

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. АУИТ ДонГТУ Кухаревым А. Л., начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.

Статья поступила в редакцию 02.10.2026.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Куберский Сергей Владимирович, *канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий Донбасский государственный технический университет,*
г. Алчевск, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ

Kuberskii S. V. *(Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)*

DEVELOPMENT OF A CALCULATION MODEL FOR STRUCTURAL PARAMETERS OF THE INTERMEDIATE LADLE AND TECHNOLOGICAL MODES OF ELECTRO-MAGNETIC STEEL TREATMENT

A hydraulic model for calculating the design parameters of the intermediate ladle and technological modes of electromagnetic steel treatment has been proposed. The model verification was carried out by means of results from physical modeling of the electromagnetic stirring process of Wood's alloy and its adequacy. The predicted dimensions of the intermediate ladle with a 1 m ³ volume and the parameters of electromagnetic steel stirring in it have been determined in order to ensure the set flow rates that promote effective melt homogenization and the removal of non-metallic inclusions. Pathways for the further model improvement are shown.

Key words: *continuous casting, steel, quality, modelling, electromagnetic stirring, intermediate ladle, averaging, refining, processing parameters.*

References

1. Smirnov A. N., Kravchenko A. V., Verzilov A. P., Efimova V. G. Modern intermediate ladles for high-productivity CCMs [Sovremennye promezhutochnye kovshi dlya vysokoproizvoditel'nyh MNLZ]. Chernaya metallurgiya: byul. in-ta «Chermetinformaciya». 2012. No. 9. Pp. 19–27. EDN PDBEXX

2. Efimova V. G. Analysis of steel refining in the intermediate ladle [Analiz rafinirovaniya stali v promezhutochnom kovshe]. Stal'. 2020. No. 6. Pp. 17–20. EDN KJQZSH

3. Terent'ev D. V., Tochilkin V. V. Development of steel casting process technology and refinement of the intermediate ladle equipment designs for billet CCM [Razvitie tekhnologii processa razlivki stali i sovershenstvovanie konstrukcij oborudovaniya promezhutochnogo kovsha sortovoj MNLZ]. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva. 2020. No. 4 (35). Pp. 25–28. EDN BPFCXK

4. Protopopov E. V., Chislavlev V. V., Temlyancev M. V., Golovatenko A. V. Improving the refining efficiency of rail steel in CCM intermediate ladles based on a rational organization of hydrodynamic processes [Povyshenie effektivnosti rafinirovaniya rel'sovoj stali v promezhutochnyh kovshah MNLZ na osnove racional'noj organizacii gidrodinamicheskih processov]. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya. 2020. Vol. 63. No. 5. Pp. 298–304. DOI: 10.17073/0368-0797-2020-5-298-304 EDN DURJZB

5. Dubodelov V. I. [et al.]. Hydrodynamic and physico-chemical processes in the intermediate ladles for continuous steel casting [Gidrodinamicheskie i fiziko-himicheskie processy v promezhutochnyh kovshah dlya nepreryvnogo lit'sya stali]. K. : Naukova dumka. 2018. 263 p.

6. Chen X., Wang P. & Zhang J. Evaluation of the Adaptability of the Dual-Port Channel in Induction Heating Tundish. Metallurgical and Materials Transactions B. 2025. Vol. 56. Pp. 2437–2452. DOI: 10.1007/s11663-025-03491-1 EDN OPIGYJ

7. Hao M., Yin Y., Yang B., Wang L. Quantitative impacts of induction heating power on refractory erosion and inclusion behaviour in tundishes. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2026. Vol. 126. No. 5. Pp. 297–308.

8. Tan H. J. [et al.]. Hydrodynamic modeling and mathematical modeling of the flow field and removal of inclusions in a seven-hand continuous casting pouring ladle with canal induction heating [Gidrodinamicheskoe modelirovanie i matematicheskoe modelirovanie polya potoka i udaleniya vklyuchenij v semiruch'evom razlivochnom kovshe nepreryvnogo lit'ya s kanal'nym indukcionnym nagrevom]. Acta Metallurgica Sinica. 2021. Vol. 57. Pp. 1229–1240.

9. Smirnov A. N., Smirnov E. N., Verzilov A. P. Physical simulation of the circulation flows and removal of inclusions in the intermediate ladle using a rotating electromagnetic field [Fizicheskoe modelirovanie cirkulyacionnyh potokov i udaleniya vklyuchenij v promezhutochnom kovshe s primeneniem vrashchayushchegosya elektromagnitnogo polya]. Chernye metally. 2020. No. 7. Pp. 14–19. EDN BZDPFP

10. Bhattacharya T. [et al.]. Development of next-generation impact pads for producing ultraclean steel using mathematical models and plant trials. AISTech 2016 Proceedings. Pp. 1547–1572.

11. Meijie Z. [et al.]. Numerical simulation and industrial practice of inclusion removal from molten steel by gas bottomblowing in continuous casting tundish. Journal of Mining and Metallurgy Section B Metallurgy. 2011. Vol. 47. No. 2. Pp. 137–147.

12. Solhed H., Jonsson L., Jonsson P. Modelling of the steel/slag interface in a continuous casting tundish. Steel Research International. 2008. Vol. 79. No. 5. Pp. 348–357. DOI: 10.1002/srin.200806137

13. Liu Z. Q., Qi F. S., Li B. K., Cheung S. C. P. Modeling of bubble behaviors and size distribution in a slab continuous casting mold. International Journal of Multiphase Flow. 2016. Vol. 79. Pp. 190–201. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2015.07.009

14. Kukharev A. L. Modeling of mixing processes in electro-vortex melt flows [Modelirovanie processov peremeshivaniya pri elektrovihrevyh techeniyah rasplava]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2025. No. 8 (82). Pp. 27–35. EDN JMUNFJ

15. Fejler S. V., Protopopov E. V., Komshukov V. P., Ganzer L. A. Development of a mathematical model and numerical calculations of hydrodynamic flows in the intermediate ladle of continuous casting machine [Razrabotka matematicheskoj modeli i chislennye raschety gidrodinamicheskih potokov stali v promezhutochnom kovshe mashiny nepreryvnogo lit'ya zagotovok]. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya. 2008. No. 12. Pp. 15–21. EDN JXGHJP

16. Kuberskii S. V. Hydraulic calculation of the tundish continuous casting machine with electromagnetic stirrer [Gidravlicheskij raschet promezhutochnogo kovsha MNLZ, oborudovannogo elektromagnitnym peremeshivatelem]. Sbornik nauchnyh trudov. 2013. Iss. 40. Pp. 87–95.

17. Kutateladze S. S., Borishanskij V. M. Handbook on heat transfer [Spravochnik po teploperedache]. M. — L. : Gosenergoizdat. 1959. 414 p.

18. Idel'chik I. E. Manual of hydraulic resistors [Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam]. Eds. Shtejnberg M. O. 3 ed. repr. and add. M. : Mashinostroenie. 1992. 672 p.

19. Lojcyanskij L. G. Fluid and gas mechanics : studies for universities [Mekhanika zhidkosti i gaza : ucheb. dlya vuzov]. 7 ed. revised. M. : Drofa. 2003. 840 p.

20. Shlihting G. Boundary layer theory : translated from German [Teoriya pogranichnogo sloya : per. s nemeckogo]. M. : Nauka. 1974. 712 p.

21. Kazandzhan B. I., Matveev V. M., Tsavich T. B., Umarov A. M. Experimental study of the conductivity, density and viscosity of a Wood alloy [Eksperimental'noe issledovanie elektroprovodnosti, plotnosti i vyazkosti splava Vuda]. Teplofizika vysokih temperatur. Vol. 27. No. 2. Pp. 269–273.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Kuberskii Sergey Vladimirovich, *PhD in Engineering, Professor, Professor of the Department of Metallurgical Technologies*
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru