

УДК 621.745.334: 669.13: 662.69

В.Н. Гуцин, В.А. Ульянов, А.А. Кузякина

МЕТОДИКА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены особенности физического и математического моделирования многофазных потоков в металлургических агрегатах и приведена методика определения масштабов моделирования при комплексном исследовании динамики расплава, газовых, примесных включений и шлаковых покрытий.

Ключевые слова: физическое моделирование, масштабы моделирования, внешние воздействия, неметаллические включения, кристаллизатор, промежуточный ковш.

Для промышленных металлургических агрегатов и устройств характерна сложная совокупность гидродинамических, тепловых и химических процессов, сопровождающихся эндо- и экзотермическими реакциями, газовой выделением, тепло- и массообменом, диффузией, адсорбцией и т.д. Характер, интенсивность и соотношение этих факторов в конечном итоге и определяют качество протекающих технологических процессов.

Сложность этих процессов создаёт значительные трудности для изучения и выбора методов исследования их закономерностей. Особенно сложности возникают при исследовании многофакторных, многокомпонентных и неоднородных систем, а также при идентификации исходных данных и мониторинга реальной технологической системы с выбранными методами анализа. Одним из подобных примеров является исследование гидродинамики многокомпонентной системы (расплав, твердая фаза, газовые и неметаллические включения и т.д.) при неоднородных условиях на границе подвода расплава и на элементах, изменяющих направление и характер потоков (порогах, перегородках, отражателях и др.). В этих случаях целесообразным представляется изучение в первую очередь основных процессов с использованием методов физического и математического моделирования [1].

В работе [2] доказано, что в условиях подачи жидкого металла из одной емкости в другую под уровень соблюдения идентичности чисел Боде для модели и оригинале становится не обязательным условием из-за малости по сравнению с другими числами подобия. Это обстоятельство позволяет в первую очередь принимать линейный масштаб моделирования, исходя из конструктивных соображений. С другой стороны, появляется возможность проведения моделирования в широком диапазоне линейных масштабов моделирования от 0,4 до 8,0. Систему уравнений сплошности, передачи импульса и энергии и критериальную зависимость для моделирования этих процессов в этом случае можно записать в следующем виде:

$$W \nabla \theta = \nabla^2 \theta (1/Ne), \quad (1)$$

$$W \nabla W = (1/Ne) \Delta f'' + (Ne/Fr \cdot Re) \theta - (1/Ne) \nabla P_{\kappa} + (1/Re) \nabla^2 W; \quad (2)$$

$$W_{\kappa} = f(Fr, Ne, Re, X, Y). \quad (3)$$

Исходя из этих зависимостей, рассчитываются масштабы моделирования при заданных граничных условиях [1]:

- линейный масштаб (при $X, Y = idem$) $M_x = (X_o)_o / (X_o)_m; \quad (4)$

- масштаб скоростей (при $Re \cdot Fr = idem$) $M_{\omega} = \sqrt[3]{\nu_o / \nu_m}; \quad (5)$

- масштаб расхода (при $Re \cdot Fr \cdot X, Y = idem$) $M_v = M_\omega M_x^2$ (6)

- масштаб времени протекания процессов в модели “м” по отношению к оригиналу “о” (при $Ne = idem$) $M_\tau = \omega_o (X_o)_m / \omega_m (X_o)_o = M_\omega / M_x$ (7)

где $Re = \omega_k X_o / \nu$, $Fr = \omega^2 / g X_o$, $Nu = \alpha_{ж} X_o / \lambda_{ж}$, $Ne = X_o / \omega \tau$ – числа подобия Рейнольдса, Фруда, Нуссельта, Ньютона; X_o , $X = x / X_o$ и $Y = y / Y_o$ – характерный размер и безразмерные координаты; $\alpha_{ж}$ и $\lambda_{ж}$ – коэффициенты теплоотдачи от жидкого металла и теплопроводности; $W_k = \omega_k / \omega_{ж}$, $W_x = \omega_x / \omega_{ж}$ и $W_y = \omega_y / \omega_{ж}$ – безразмерные скорости конвекции и ее проекции на оси x и y ; ω_x и ω_y – скорость невозмущенного потока и текущая скорость; $T = t / t_{фр}$, $T_{ж} = t_{ж} / t_{фр}$ – безразмерные температуры: текущая и жидкого металла в невозмущенном потоке; C_o – безразмерный коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты мениска, θ – безразмерная температура среды; ρ – плотность среды; g – ускорение силы тяжести; P_k – давление потока.

Гидродинамика и массообменные процессы в жидкой ванне во многом определяют интенсивность технологических процессов. В сталеплавильном производстве решающая роль этих факторов является общепризнанной. Дело в том, что большинство реальных процессов вообще и металлургических в частности идёт в диффузионной области. А при продувке жидкой ванны резко изменяется гидродинамическая обстановка (степень барботаж, эмульгирования, циркуляции, контакта фаз, обновления межфазных поверхностей и т.д.) в зависимости от параметров ванны, фурм и дутья. Это приводит к тому, что медленные процессы массо- и теплообмена определяются молярной диффузией и конвективным переносом.

Сложность и недостаточная изученность процессов не позволяет оценить сопротивление массопереносу отдельно в газовой и жидкой фазах. В свою очередь соотношение этих сопротивлений может быть различным не только для различных процессов, но в пределах одного цикла (плавки). Поэтому на данном уровне наших знаний представляется наиболее целесообразным при исследовании проводить схематизацию (идеализацию) процесса.

При схематизации принимают, что процессы теплопереноса в технологической зоне (ванне) однозначно определяются процессами массопереноса и что массообмен является лимитирующим звеном или в газовой, или жидкой фазе. Исследования на модели этих крайних случаев позволяют охватить во всем диапазоне возможные реальные процессы по характеру массообмена и, следовательно, получить обобщающие зависимости, справедливые для оценки массообменных процессов в металлургическом объекте при подобных условиях.

Параметр f'' в уравнении (2) носит смысл раздела фаз. В случае изучения поведения твердых и жидких примесных образований в условиях вынужденной конвекции уравнение (2) принимает вид:

$$W \nabla W = Ar \cdot \Delta f'' + (Ne / Fr \cdot Re) \theta - (1 / Ne) \nabla P_k + (1 / Re) \nabla^2 W ; \quad (8)$$

$$W_k = f (Fr, Ne, Re, Ar, X, Y), \quad (9)$$

где $Ar = g X_o^3 (\rho_v - \rho_{ж}) / \rho_{ж} \nu^2$ – число подобия Архимеда; индексы «в» и «ж» принадлежат соответственно к включению и расплаву; ν – кинематическая вязкость расплава.

На основании идентичности чисел подобия Ar определяют линейный масштаб этих примесных образований:

$$\text{при } \text{Ar} = \text{idem}, M_x^{np} = \sqrt[3]{v_o^2 \rho_{жo} (\rho_B - \rho_ж)_M / v_M^2 \rho_{жM} (\rho_B - \rho_ж)_o} \quad (10)$$

Для случая изучения поведения газовых включений в расплаве уравнения (8) – (10) принимают вид

$$W \nabla W = (\text{Ne}^2 / \text{Bo}^2 \text{Ga}) \Delta f'' + (\text{Ne} / \text{FrRe}) \theta - (1 / \text{Ne}) \nabla P_K + (1 / \text{Re}) \nabla^2 W, \quad (11)$$

$$W_K = f(\text{Fr}, \text{Ne}, \text{Re}, \text{Bo}^2 \text{Ga}, X, Y), \quad (12)$$

где $\text{Bo} = \sigma / \rho_{жo} X_o \omega_K^2$, $\text{Ga} = g X_o^3 / \nu$ - числа подобия Бодэ и Галилея; σ - коэффициент поверхностного натяжения.

На основании идентичности комплексов чисел подобия $\text{Bo}^2 \text{Ga}$ рассчитывают линейный масштаб газовых включений:

$$\text{при } \text{Bo}^2 \text{Ga} = \text{idem}, M_x^r = X_o^r / X_M^r = \sqrt[3]{(v_o / v_M)^2 / (X_o / X_M)}, \quad (13)$$

где X_o^r, X_M^r - характерные размеры пузырька; v_o, v_M - кинематические вязкости сред оригинала и модели.

Для расчета линейного масштаба на границе шлак-металл используют зависимости вида:

$$W \nabla W = (1 / \text{Bo}') \Delta f'' + (\text{Ne} / \text{Fr} \cdot \text{Re}) \theta - (1 / \text{Ne}) \nabla P_K + (1 / \text{Re}) \nabla^2 W; \quad (14)$$

$$W_K = f(\text{Fr}, \text{Ne}, \text{Re}, \text{Bo}', X, Y). \quad (15)$$

$$\text{Линейный масштаб при } \text{Bo}' = \text{idem}, M_x^m = \sqrt{\sigma_o \rho_M^m / \sigma_o^m \rho_o}, \quad (16)$$

где σ_o, σ_M - коэффициенты поверхностного натяжения на границе раздела фаз оригинала и модели; ρ_o^m, ρ_M^m - плотности шлаковых покрытий оригинала и модели.

Моделирование газожидкостных систем осуществляется в общем случае в соответствии с зависимостью $f(\text{Fo}, \text{Fr}, \text{Eu}, \text{Re}, \text{Bo}, \bar{\rho}, \bar{\nu}, \bar{u}, \text{Ma}, k, X, Y) = 0$, где $\text{Fo} = a \tau / X_o^2$, $\text{Eu} = \Delta p / \rho_{жo} \omega_K^2$ - числа подобия Фурье, Эйлера; a - коэффициент температуропроводности.

Условия подобия гидродинамических и массообменных процессов в газо-жидкостных системах (например, в жидкой ванне при продувке газами) получаются из анализа уравнений неразрывности, Навье - Стокса и Клайперона ($\omega d\omega + a^2 dp / \rho = 0$).

В этом случае исходные для анализа уравнения или размерные величины, характеризующие процессы, должны включать ещё и межфазные параметры.

Из общих соображений следует, что для случаев, например, интенсивного барботажа жидкой ванны, одним из определяющих факторов является расход газа на единицу сечения ванны, т.е. приведённая скорость газа (обозначим её через u , м/с), которую называют также *напряжённостью дутья* или *газовой нагрузкой*. Этот факт подтверждается многочисленными экспериментальными зависимостями, полученными в области химической технологии, где обобщение результатов проводят, как правило, с учётом симплекса приведённых скоростей газа и жидкости. К необходимости использования именно приведённых скоростей приходят также исследователи в области теплоэнергетического оборудования, при моделировании сталеплавильных ванн, барботируемых пузырями окиси углерода, и т.д. Такой подход объясняется в некоторой мере тем, что истинные значения скоростей компонентов двухфазных систем сложно определить вследствие их переменности как в пространстве, так и времени.

Выход из указанного положения заключается в максимально возможном упрощении

этих зависимостей путём оценки значимости отдельных критериев (чисел) подобия. Такой анализ с использованием многочисленных литературных данных позволяет констатировать следующее:

- симплекс плотностей $\bar{\rho}$ в качестве самостоятельного критерия оказывает слабое влияние на гидродинамические процессы в ванне. Более полно гидродинамические, а в некоторых работах и массообменные процессы определяются безразмерным импульсом струи или модифицированным критерием Архимеда в форме следующего комплекса из критериев Fr и $\bar{\rho}$:

$$Ar_M = 1/Ar = Fr/\bar{\rho} = \omega^2 \rho_r / g X_o \rho_{ж}; \quad (17)$$

- вязкость газа не оказывает существенного влияния на гидродинамические и массообменные процессы в ванне, а влияние вязкости жидкости на массообмен весьма невелико. В большинстве реальных случаев в результате больших скоростей струй и размеров жидких ванн гидродинамический режим как по газу, так и по потокам жидкости характеризуется высокой турбулентностью (автомодельная область) и, следовательно, вырождением влияния Re . Необходимо, кроме того, отметить, что критерий Re по жидкости практически неопределим, поскольку неизвестны истинные значения определяющих скоростей потоков жидкости и геометрического параметра;
- на массообменные процессы оказывают влияние скорости истечения газа, т.е. инерционные силы струй (Re и Ar_M). Следует отметить, что струи газа являются первичными факторами в создании гидродинамической обстановки в ванне, и их характеристики определяют характер потоков в жидкости.

В связи с этим в дальнейшем приближённом моделировании, вместо использования группы критериев (Re , Fr , $\bar{\rho}$, \bar{v}), ограничились соблюдением подобия по критериям Ar_M и Re , рассчитанным по газу.

Таким образом, вводя в условия однозначности газовую нагрузку u , с помощью рассмотренных приёмов получаем следующее критериальное равенство, описывающее подобие гидродинамических процессов в газожидкостной системе в общем виде:

$$f(Fr_{ж}, Re_{ж}, Re_r, Bo_{ж}^2 Ga_r, \bar{\rho}, \bar{v}, \bar{u}, Ma, k, X, Y) = 0, \quad (18)$$

где $\bar{\rho} = (\rho_{ж} - \rho_r) / \rho_r$; $\bar{v} = v_{ж} / v_r$; $\bar{u} = u / \omega = Q / F\omega$; индекс «г» обозначает принадлежность газовому включению.

Из-за малых относительно звукового барьера скоростей подачи газа на продувку и относительно незначительного влияния на процесс продувки критерия Маха (Ma), показателя адиабаты k , симплексов \bar{v} и \bar{P} [2] их в критериальной зависимости можно не учитывать. Для расчёта масштабов моделирования для жидкой ванны используем зависимости $(Fr_{ж}, Re_{ж}, X, Y)$ с учётом равенства отношений начальных количеств движения (импульсов)

потоков на оригинале и модели: $\bar{I} = \bar{m}\bar{\omega} = (\bar{\rho}\bar{Q}^2 / \bar{F}) = \bar{\rho}\bar{\omega}^2 \bar{F} = idem$. Расчёт линейного

масштаба газовых пузырьков M_x^r осуществляется из комплекса Бодэ - Галилея $Bo_{ж}^2 Ga_r$, входящего в выражение (18).

Из условия $Reg = idem$ определяют масштаб скоростей ввода газового потока $M_\omega^r = (\omega_o / \omega_m)^r = v_o^r X_m^r / v_m^r X_o^r$, а из условия $\bar{u} = u / \omega = Q / F\omega = idem$ – масштаб расхода

продувочного газа $M_Q^r = X_o^{r2} \omega_o^r / X_m^{r2} \omega_m^r$.

На основе разработанной методики было проведено моделирование процесса непрерывной разливки из 50 т промежуточного ковша с применением различных технических решений с промышленной проверкой полученных результатов. Моделирование

проводилось на воде с имитацией включений молотым древесным углём и ряда других добавок. Технология моделирования и определения уровня очистки модельной жидкости подробно описаны в работе [1].

На рис. 1 приведены сравнительные данные по влиянию на индекс загрязнённости разливаемой стали при применении различных технологических решений [1, 3-5]: обычная конструкция промежуточного ковша; с продувкой инертным газом через щелевые вставки между сливными отверстиями; с разделением промковша на приёмный и разливочные отсеки полнопрофильными перегородками с перепускными отверстиями; с продувкой и использованием полнопрофильных перегородок.

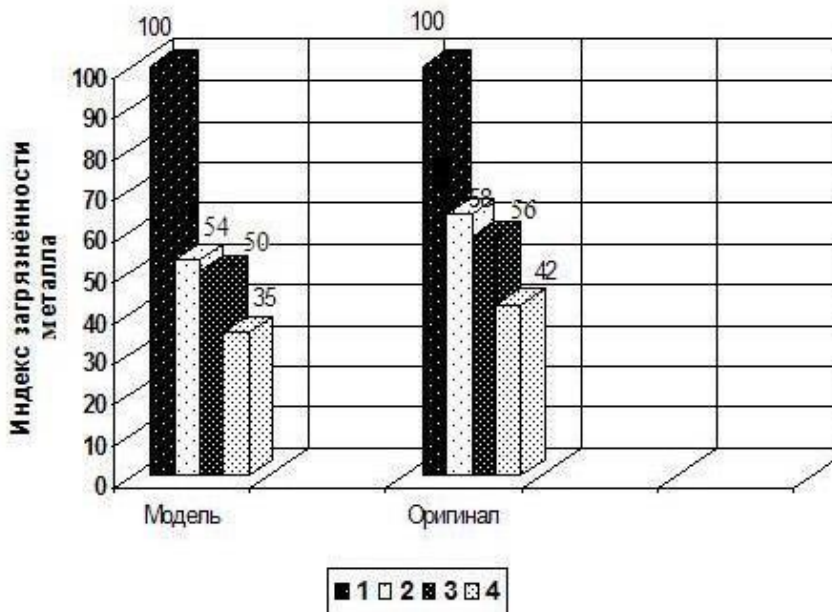


Рис. 1. Сравнительные данные по влиянию на индекс загрязнённости разливаемой среды при применении различных технологических решений:

1 - обычная конструкция промковша; 2 - с продувкой через щелевые вставки между сливными отверстиями; 3 - с разделением промковша на приёмный и разливочные отсеки полнопрофильными перегородками с перепускными отверстиями; 4 - с продувкой и полнопрофильными перегородками

Испытание применения разделяющих промковш на отсеки перегородок со специальной конструкцией перепускных отверстий при вводе аргона между ними и перепускными отверстиями показали [3-5], что чистоту стали можно значительно повысить на сливе в кристаллизатор по сравнению с исходным составом. Сопоставление теоретических и наблюдаемых в промышленных условиях значений индекса загрязнённости стали показывает, что в реальных условиях на количественное содержание примесных включений в литом металле большое значение играет вязкость и основность шлакового покрова [4]. Индекс загрязнённости на модели определялся по количеству включений, поступающих на слив из промковша в единицу времени. Для определения уровня индекса чистоты стали типа 17Г1СУ,09Г2С,10ХСНД [3] отбирались шлифы и подсчитывались все виды включений от 10 мкм и выше, приходящихся на единицу поверхности. В качестве верхнего уровня индекса загрязнённости стали на рис. 1 приняты шлифы, имеющие на единицу площади среднее количество всех видов включений 14 шт./см².

В ходе проведённых исследований установлено, что ввод аргона через верх защитной трубы в количестве 1,0–1,5 м³/ч способствует снижению в большей степени мелких включений (менее 500 мкм), а технические решения, связанные с конструкциями перегородок – более крупных. Максимальный эффект был получен при комплексном использовании продувки и полнопрофильных перегородок рациональных параметров.

Таким образом, разработанные методы физического моделирования совместно с математическими моделями позволяют решать задачи динамики многокомпонентных технических систем с учётом неоднородности исследуемых сред и разрывных граничных условий на выходе расплава из каналов сложной формы, переходе потока в вихревые течения, обтекании, отражении, встречном течении при реализации технических решений в проковшах, кристаллизаторах и др.

Библиографический список

1. **Гущин, В.Н.** Методы исследования и разработка градиентных промышленных технологий управления тепломассообменными процессами при разливке и формировании непрерывнолитых и стационарных заготовок: учеб. пособие / В.Н. Гущин, В.А. Ульянов; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 141 с.
2. **Скворцов, А.А.** Влияние внешних воздействий на процесс формирования слитков и заготовок / А.А. Скворцов, А.Д. Акименко, В.А. Ульянов. – М.: Metallurgia, 1991. – 216 с.
3. Оптимизация гидродинамических характеристик промежуточного ковша УНРС с целью удаления экзогенных неметаллических включений / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, В.Н. Гущин [и др.] // *Металлург.* 2004. №4. С. 47–50.
4. Эффективность рафинирования стали в промежуточном ковше с перегородками / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, В.Н. Гущин [и др.] // *Металлург.* 2004. №8. С. 43–45.
5. Разработка технологии рафинирования стали от крупных неметаллических включений в промежуточных ковшах / А.В. Куклев, В.В. Тиняков, В.Н. Гущин [и др.] // *Опыт поузловой модернизации МНЛЗ с внедрением современных технологических решений в области непрерывной разливки стали.* – Орск, 2003. С. 9–13.

*Дата поступления
в редакцию 20.06.2013*

V.N. Gushchin, V. A. Ulyanov, A.A. Cuzyakina

METHODS PHYSICAL MODELING OF MULTIPHASE FLOW

Nizhne Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: research-and-development of features of physical and mathematical design of multiphase streams in metallurgical aggregates methodology of scaling of design at complex research of dynamics of fusion, gas, admixture including and slag coverages.

Design/methodology/approach: the methods of physical and mathematical design of much-phase streams were used in metallurgical aggregates.

Findings: on the basis of the worked out methodology the design of process of continuous teem was conducted from an intermediate scoop with the use of different technology decisions with industrial verification of the got results. An estimation is conducted on influence on the index of muddiness became different structural and technology decisions for an intermediate scoop for a continuous teem became.

Research limitations/implicftions: the set criterion dependences allow to set intercommunication between hydrodynamics of teem, and also behavior non-metal and gas inclusions in a molten metal.

Originality/value: the worked out methodology of physical design of multiphase streams of allows to decide the tasks of dynamics of the technical systems taking into account heterogeneity of environments and determine the rational modes of teem in scoops and other metllurgical objects.

Key words: physical modeling, scale modeling, external influences, nonmetallic inclusions, mold, a tundish.