

А. С. Лантух, аспирант

Л. С. Молчанов, канд. техн. наук, доцент

Е. В. Синегин, канд. техн. наук, доцент, e-mail: kaf.stal@metal.nmetau.edu.ua

Национальная металлургическая академия Украины, Днепр

## Физическое моделирование всплывания неметаллических включений в сталеразливочных ковшах малой емкости

В статье приведены результаты физического моделирования всплывания группы неметаллических включений в сталеразливочных ковшах малой емкости. По результатам эксперимента была подтверждена гипотеза о незначимости влияния относительного размера частиц, имитирующих неметаллические включения, на продолжительность их всплывания. Путем статистической обработки результатов эксперимента определена математическая модель, описывающая общую продолжительность всплывания группы неметаллических включений. Результаты эксперимента доказывают возможность физического моделирования процессов удаления неметаллических включений из стали на масштабных моделях.

**Ключевые слова:** физическое моделирование, автомодельность, неметаллические включения, всплывание.

**Введение.** Современный уровень развития сталеплавильного производства характеризуется повышением требований к качеству и потребительских свойств металлопродукции в условиях развития рыночной конкуренции. При этом высокие требования к качеству изделий обычно рассматриваются в тесной взаимосвязи с его себестоимостью, что предопределяет актуальность проблемы снижения материало- и ресурсоемкости продукции на всех этапах производства. На сегодняшнем этапе развития сталеплавильного производства неотъемлемой его частью становится внепечная обработка стали. Но отдельная категория так называемых мини-заводов и до сих пор лишена мощностей для внепечного рафинирования стали, в частности и от неметаллических включений (НВ). Для этих и некоторых других категорий предприятий одним из возможных вариантов удаления НВ является оптимальная длительность отстаивания ковша со сталью перед разливкой.

**Постановка цели и задачи исследования.** Основными силами, которые воздействуют на твердые или жидкие частицы НВ в жидкой стали, являются силы тяжести, Архимеда, вязкого трения. При всплытии частицы сферической формы в ламинарном режиме при числах Рейнольдса  $Re < 2$  скорость ее движения определяют из условий равновесия сил, которые на нее действуют. Закон для определения скорости всплывания частицы в жидкости – закон Стокса [1]. Однако вследствие ряда причин, в частности, из-за перехода частицы в турбулентный режим движения, всплывания группы (ансамбля) частиц и т. д., закон Стокса может нарушаться. То же самое наблюдается и в реальных условиях всплывания НВ в сталеразливочном ковше в течение выдержки стали перед разливкой: отличные от сферической формы НВ, одновременное движение группы НВ, их всплывание в переходном или турбулентном режиме.

Определенное влияние на скорость всплытия НВ имеют и конвекционные потоки, вызванные как

естественной конвекцией, инициированной разницей температуры по высоте ковша, так и искусственной, что имеет место непосредственно при выпуске стали из печи в ковш и в течение некоторого времени после его завершения.

Целью исследований является определение продолжительности всплытия НВ в условиях нарушения закона Стокса. При проведении моделирования учтено влияние на частицы НВ силы Архимеда и вязкого трения, а также конвекционных потоков, образованных в объеме расплава, при выпуске стали из печи в ковш. Влиянием естественной конвекции было решено пренебречь для упрощения эксперимента.

**Методика моделирования.** По результатам подготовительного этапа авторами с использованием  $\pi$ -теоремы было установлено, что процесс всплывания НВ после наполнения сталеразливочного ковша можно описать критерием Архимеда (**Ar**), модифицированным критерием гомохронности (**Ho<sub>m</sub>**) и линейным симплексом (**D**):

$$Ar = \frac{\Delta\rho \cdot g \cdot d_{ni}^3}{\rho_{liq} \cdot \nu_{liq}^2}, \quad Ho_m = \frac{g \cdot \tau^2}{h_{liq}}, \quad D = \frac{d_{ni}}{h_{liq}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{liq}$  и  $\Delta\rho$  – соответственно плотность жидкости и разность плотностей жидкости и НВ, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $d_{ni}$  – диаметр НВ, м;  $\nu_{liq}$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время, с;  $h_{liq}$  – уровень жидкости в ковше, м.

Однако при расчете масштабов моделирования авторы столкнулись с проблемой выбора модельных веществ, которые бы удовлетворяли условию:

$$\begin{cases} Ar = idem, \\ Ho_m = idem, \\ D = idem. \end{cases} \quad (2)$$

Кроме того, материал, имитирующий НВ, должен иметь форму, приближенную к сферической, а также не растворяться и не комковаться в воде. Этим требованиям идеально удовлетворяет полиэтилен и стеарин. Однако линейный масштаб для этих материалов составляет 1,8, то есть модель ковша должна быть в 1,8 раза больше оригинала. Использование меньшего линейного масштаба требует использования вместо воды жидкостей с низкой плотностью и/или вязкостью.

Для решения этой проблемы авторами была использована техника приближенного подобия, согласно которой безразмерными критериями, которые имеют незначительное воздействие на процесс, можно пренебречь. Таким критерием в данном случае является безразмерный симплекс (**D**). Пренебрежение этим симплексом позволяет использовать несопоставимые по размерам модели ковша и порошки, имитирующие НВ, при физическом моделировании. Для этого следует сначала экспериментально доказать гипотезу об автомодельности линейного симплекса в области его определения для оригинала.

Для экспериментального подтверждения выдвинутой гипотезы была собрана экспериментальная установка, составлен план эксперимента и проведена серия из 15 опытов. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1.

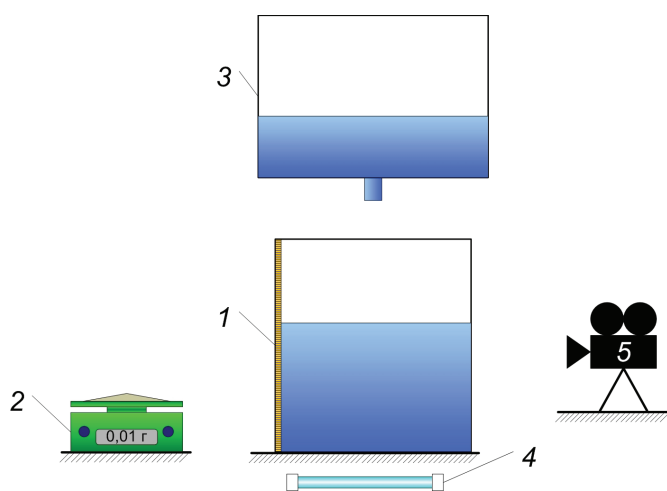


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – модель ковша; 2 – электронные весы; 3 – буферная емкость; 4 – галогенная лампа; 5 – видеокамера

Установка состояла из набора моделей ковша 1 разных размеров. Необходимость использования нескольких емкостей различных размеров вызвана необходимостью варьирования величин критерия Архимеда и линейного симплекса в заданных пределах независимо друг от друга. Поскольку в оба критерия входит ( $d_{ni}$ ), то использование емкости одного размера при изменении фракции порошка привело бы к возникновению корреляционной связи между (**Ar**) и (**D**), а следственно к невозможности доказательства автомодельности одного из них. Перед началом опыта навеску стеарина взвешивали на электронных весах 2 с пределом точности 0,01 г, исходя из подобию объемной концентрации порошка в жидкости на модели и оригинале  $0,00288 \text{ м}^3/\text{м}^3$  [2]. Взвешенную

навеску порошка осторожно загружали на дно ковша, после чего заливали с буферной емкости 3 воду. Высоту сливного отверстия над днищем модели ковша меняли с учетом линейного масштаба для данного опыта. Снизу ковш подсвечивался галогенной лампой 4 мощностью 150 Вт. Длительность всплытия определяли по видеозаписи опытов, которые осуществляли на видеокамеру 5 в режиме HD.

Согласно методике Маркова [3] об автомодельности безразмерного критерия можно судить по графику дифференциальной зависимости между логарифмами критериев, то есть:

$$\frac{d \lg \pi_y}{d \lg \pi_x} = f(\lg \pi_x).$$

При этом он выделяет 3 возможных варианта:

- 1)  $\frac{d \lg \pi_y}{d \lg \pi_x} = var$  – область существенного влияния критерия,
- 2)  $\frac{d \lg \pi_y}{d \lg \pi_x} = 0$  – область автомодельности критерия,
- 3)  $\frac{d \lg \pi_y}{d \lg \pi_x} = const$  – область несамостоятельного

(формального) влияния критерия.

Для выявления области автомодельности линейного симплекса (**D**) были построены графики функции  $\lg Ho_B = f(\lg D)$  и  $\frac{d \lg Ho_B}{d \lg D} = f(\lg D)$  (рис. 2).

Из рис. 2, б видно, что производная логарифма критерия гомохронности равна нулю при  $\lg D < -2$  ( $D < 0,01$ ). Это означает, что подобие процесса всплытия НВ при выдержке стали в ковше выполняется при условии, что диаметр НВ минимум в 100 раз меньше уровня жидкой стали в ковше. Этого условия достаточно и при проведении физического моделирования на модели 60-т ковша, выполненной в масштабе 1:10 (283 мм) к оригиналу. Автомодельным для указанной модели является размер НВ на модели меньше 2,8 мм.

Следующим этапом было определение регрессионных коэффициентов математической модели для описания времени всплытия НВ. Поскольку зависимость между безразмерными критериями всегда имеет вид степенной функции, нахождение коэффициентов регрессии осуществляли по логарифмам значений аргументов и функции. Реализовав, таким образом, линеаризацию найденной степенной функции, находим коэффициенты регрессии линейного уравнения и пересчитываем их на степенную функцию [4].

Коэффициенты регрессии и регрессионная статистика для степенной модели приведены в табл. 1.

Судя по величине коэффициента аппроксимации и критерия Фишера, полученная математическая модель является достаточно адекватной. Сравнив величину критерия Стьюдента для критерия гомохронности

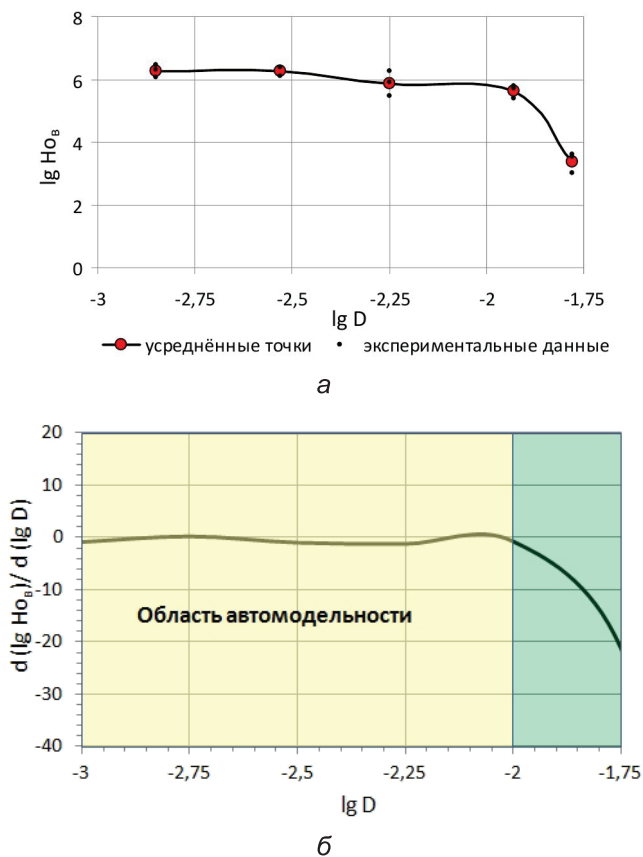


Рис. 2. Графики зависимости логарифма критерия гомогенности от логарифма линейного симплекса (а) и дифференциальной зависимости между логарифмами критериев ( $Ho_B$ ) и ( $D$ ) (б)

с критическим (табличным) значением критерия Стьюдента, был сделан вывод о его незначительном влиянии на время всплывания НВ. Отбросив его, получаем окончательную математическую модель:

$$Ho_B = 42420Ar^{-0,51}D^{-0,86}. \quad (3)$$

Ниже приведено ее графическое изображение (рис. 3), регрессионная статистика (табл. 2) и график сравнения экспериментальных данных с рассчитанными по модели (3) (рис. 4).

Математическая модель (3) адекватна в диапазоне  $10^0 < Ar < 10^4$ . При значениях указанных чисел

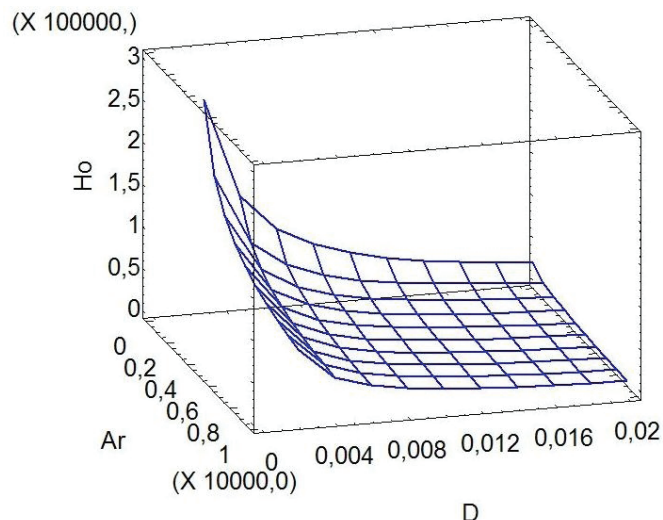


Рис. 3. Графическое изображение математической модели (3)

подобия вне указанных пределов адекватность полученной модели требует дополнительного подтверждения. Однако следует подчеркнуть, что в реальных условиях всплывание НВ размерами от 15 мкм до 3 мм в жидкой стали происходит при значениях числа Архимеда в диапазоне  $10^{-2} < Ar < 10^5$ , что незначительно шире рабочей области полученной модели.

Для того, чтобы продемонстрировать влияние количества частиц на продолжительность их всплывания в жидкости, авторы сравнили результаты, полученные по модели (3) с рассчитанными по уже известным моделям, в том числе и с законом Стокса. Известно, что при наличии в жидкости большого количества частиц, закон Стокса может существенно нарушаться [1, 5]. Объемную концентрацию частиц порошка в жидкости учитывает методика Майстрюкова [5]. На рис. 5 представлено сравнение продолжительности всплывания частиц порошка в условиях описанного физического моделирования, рассчитанного тремя вышеупомянутыми методами.

На рис. 5 видно, что среди трех рассмотренных моделей лучше продолжительность всплывания частиц порошка в данном случае описывает именно модель (3). Продолжительность всплывания, рассчитанная по закону Стокса, меньше, что соответствует

Таблица 1

#### Регрессионная статистика полученной степенной модели

Параметр	Критерий подобию			
	$\lg A^*$	$D$	$Ar$	$Ho_B$
Кoeffициент регрессии	4,6127	-0,8587	-0,5068	0,0040
Стандартная ошибка	1,7555	0,4060	0,1054	0,3825
Критерий Стьюдента	2,6276	2,1148	4,8076	0,0105
Критическая величина критерия Стьюдента ( $\alpha = 0,1$ )	1,7959			
$P$ -значения	0,0238	0,0581	0,0005	0,9918
Множественный $R$	0,9368			
$R^2$	0,8775			
Нормированный $R^2$	0,8441			
Критерий Фишера	26,2670			
Значимость критерия Фишера	$2,57 \cdot 10^{-5}$			

\*десятичный логарифм свободного члена степенного уравнения

## Регрессионная статистика окончательной степенной модели (3)

Параметр	Критерий подобию		
	Ig A	D	Ar
Коэффициент регрессии	4,6276	-0,8599	-0,5064
Стандартная ошибка	0,9938	0,3725	0,0940
Критерий Стьюдента	4,6564	2,3087	-5,3880
Критическая величина критерия Стьюдента ( $\alpha = 0,05$ )	2,1788		
P-значения	0,0006	0,0396	0,0002
Множественный R	0,9368		
R <sup>2</sup>	0,8775		
Нормированный R <sup>2</sup>	0,8571		
Критерий Фишера	42,9819		
Значимость критерия Фишера	3,38·10 <sup>-6</sup>		

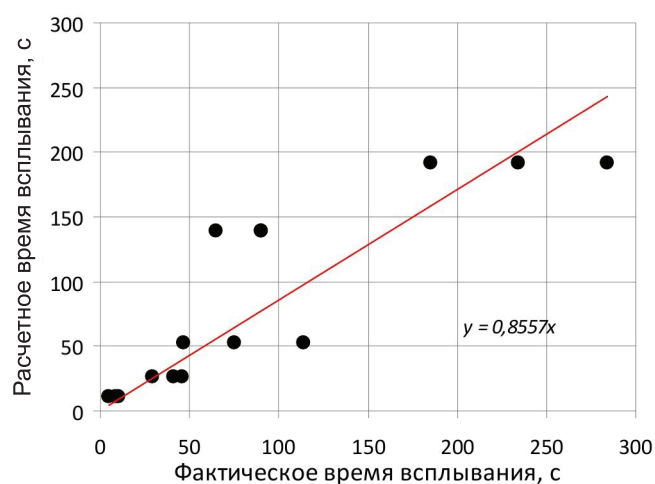


Рис. 4. Сравнение фактического времени всплывания порошка на модели с рассчитанным по математической модели (3)

теоретическим положениям, приведенным в работах [4, 5].

### Выводы

В статье приведена методика физического моделирования всплывания НВ в жидкой стали. По результатам эксперимента подтверждена автомодельность линейного симплекса, что доказывает возможность адекватного физического моделирования процесса всплывания НВ. Автомодельность линейного симплекса в области  $D < 0,01$  позволяет произвольно выбирать относительный размер частиц порошка при

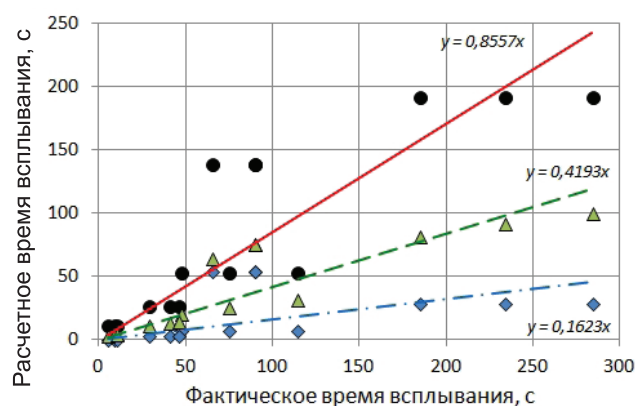
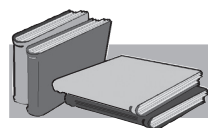


Рис. 5. Сравнение фактического времени всплывания порошка в условиях эксперимента и рассчитанного по разным формулам

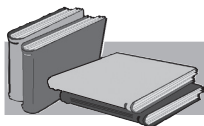
моделировании, при условии, что он не будет превышать 0,01 от уровня жидкости в ковше. Полученные результаты позволят упростить подготовку и проведение физического моделирования процессов удаления НВ из стали методами интенсификации циркуляции потоков (продувка, механическое и электромагнитное перемешивание и т. д.). По результатам статистической обработки экспериментальных данных предложена математическая модель, которая позволяет с достаточной для практических расчетов точностью определять продолжительность выдержки стали в ковше, необходимую для удаления НВ определенного размера.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Фролов Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для ВУЗов [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
2. Розробка теоретичних засад енерго- та ресурсозаощаджуючих технологій виплавки та безперервного розливання якісних марок сталей: звіт з НДР (заключний) / НМетАУ. – № ДР 0116U008351; Інв. № Б002020017. – Дніпро, 2017. – 59 с.

3. Марков Б. Л., Кирсанов А. А. Физическое моделирование в металлургии. – М.: Металлургия, 1984. – 119 с.
4. Баттизманский В. И., Яковлев Ю. Н., Паниотов Ю. С. Организация эксперимента: учеб. пособие. – К: УМКВО, 1992. – 244 с.
5. Мاستрюков Б. С. Теплофизика металлургических процессов: учебник для ВУЗов. – М.: МИСИС, 1996. – 268 с.



## REFERENCES

1. Frolov Yu. G. (1988). Kurs kolloidnoi khimii. Poverhnostnye yavleniia i dispersnye sistemy: uchebnik dlia VUZov [Course of colloid chemistry. Surface phenomena and disperse systems: a textbook for high schools]. 2nd ed. Moscow: Khimiia, 464 p. [in Russian].
2. Rozrobka teoretychnykh zasad enerho- ta resursozaoshchadzhuiuchykh tekhnolohii vyplavky ta bezperervnoho rozlyvannia yakisnykh marok stalei: zvit z NDR (zakliuchnyi) [Development of theoretical foundations of energy and resource saving technologies of melting and continuous casting of qualitative grades of steels]. Natsional'naia metallurgicheskaia akademiia Ukrainy, no. DR 0116U008351; Inv. no. B002020017, Dnipro, 2017, 59 p. [in Ukrainian].
3. Markov B. L., Kirsanov A. A. (1984). Fizicheskoe modelirovanie v metallurgii [Physical modeling in metallurgy]. Moscow: Metallurgiiia, 119 p. [in Russian].
4. Baptizmanskii V. I., Yakovlev Yu. N., Paniotov Yu. S. (1992). Organizatsiia eksperimenta: ucheb. posobie [Organization of the experiment: a tutorial]. Kiev: UMKVO, 244 p. [in Russian].
5. Mastriukov B. S. (1996). Teplofizika metallurgicheskikh protsessov: uchebnik dlia VUZov [Thermophysics of metallurgical processes: a textbook for high school]. Moscow: MISIS, 268 p. [in Russian].

### Анотація

*Лантух О. С., Молчанов Л. С., Синегін Є. В.*

Фізичне моделювання спливання неметалевих включень у сталерозливних ковшах малої ємності

У статті наведено результати фізичного моделювання спливання групи неметалевих включень у сталерозливних ковшах малої ємності. За результатами експерименту підтверджено гіпотезу стосовно незначущості впливу відносного розміру часток, що імітують неметалеві включення, на тривалість їх спливання. Шляхом статистичної обробки результатів експерименту визначено математичну модель, яка описує загальну тривалість спливання групи неметалевих включень. Результати експерименту доводять можливість фізичного моделювання процесів видалення неметалевих включень зі сталі на масштабних моделях.

### Ключові слова

Фізичне моделювання, автомодельність, неметалеві включення, спливання.

### Summary

*Lantukh O., Molchanov L., Synehin Ye.*

Physical modeling of floating of the nonmetallic inclusions in steel-teeming ladles of small capacity

The results of physical modeling of floating of a group of nonmetallic inclusions in steel-teeming ladles of small capacity are presented in the article. Based on the results of the experiment, the hypothesis was confirmed that the relative size of particles imitating nonmetallic inclusions was insignificant for the duration of their floating. By statistical processing of the results of the experiment, a mathematical model describing the total duration of the floating of a group of nonmetallic inclusions is determined. The experimental results prove the possibility of physical modeling of the processes of removal of nonmetallic inclusions from steel on scale models.

### Keywords

Physical modeling, self-similarity, nonmetallic inclusions, floating.

Поступила 16.03.18