

УДК 532.526:669.18

Жук В.И.\*

### **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

*Найдены законы изменения кинетической энергии подвижной механической системы в зависимости от времени при ее вынужденном перемешивании с постоянной и переменной мощностью. Предложены и апробированы на физической модели способы определения коэффициентов и времени затухания движения среды в зависимости от различных факторов.*

Изучение процессов перемешивания жидких металлов приобрело приоритетное значение в современной металлургической технологии в связи с проблемой управления гидродинамикой расплавленного металла и, как следствие, качеством слитка [1]. Внедрены в промышленность разнообразные методы воздействия на затвердевающий металл при разливке и кристаллизации стали в УНРС, изложницах, в литейных формах. В настоящее время существует широкий спектр видов воздействия от обычного механического до электромагнитного перемешивания [2]. Однако расчет параметров перемешивания и их влияния на качество слитков до сих пор является сложной задачей. В работе [3] приводится способ определения интенсивности перемешивания с помощью эффективных коэффициентов теплопроводности. К сожалению, до настоящего времени в публикациях по перемешиванию не учитываются диссипативные свойства систем, а также мощность перемешивания на различных этапах разливки, охлаждения и кристаллизации слитков.

Цель этой работы – последующее развитие и применение теории перемешивания подвижных сред в больших объемах и разработка методов определения параметров перемешивания при постоянной и переменной мощности.

В теории перемешивания, которая предложена в работе [4] и получила последующее развитие в работах [5, 6], интенсивность перемешивания определяется величиной кинетической энергии макродвижения  $E_k$  в соответствии с выражением (1).

$$\frac{dE_k}{dt} = N_{nep} - N_{diss} \quad (1)$$

Подведенная энергия в форме работы перемешивания определяется её мощностью  $N_{nep}$ , которая может определенным образом зависеть от времени. Интенсивность перемешивания  $E_k$  зависит не только от мощности перемешивания  $N_{nep}$ , но и от диссипативных свойств системы, которые определяются мощностью диссипации  $N_{diss}$ . Очевидно, для поддержания заданной интенсивности макродвижения ( $E_k = const$ ) необходимо подводить определенное количество энергии в единицу времени извне, равное энергии диссипации  $N_{nep} = N_{diss}$ .

Мощность диссипации  $N_{diss}$  в общем случае определяется геометрическими размерами и конфигурацией области, занятой расплавом, структурой течения, плотностью и вязкостью среды и другими параметрами. Режим течения среды - ламинарный, переходной, турбулентный – в свою очередь зависит от мощности перемешивания. Возникает нелинейная связь, которую в общем случае трудно установить для различных видов перемешивания. Однако, как показали дальнейшие исследования, в первом приближении можно принять, что мощность диссипации  $N_{diss}$  пропорциональна кинетической энергии расплава по формуле (2):

$$N_{diss} = \beta E_k, \quad (2)$$

где  $\beta$  представляет собой параметр, получивший название коэффициент затухания движения среды и характеризующий диссипативные свойства системы.

---

\*ПГТУ, канд. техн. наук, доц.

Подставляя выражение (2) в (1), получаем уравнение (3), где в правой части записан закон изменения мощности перемешивания в зависимости от времени  $N_{nep}=N_{nep}(t)$ :

$$\frac{dE_k}{dt} + \beta E_k = N_{nep}(t), \quad (3)$$

Соответственно, возникают две практически важные в технологии перемешивания задачи. Первая, прямая задача, заключается в определении закона изменения мощности перемешивания как функции времени  $N_{nep}=N_{nep}(t)$  при заданном режиме интенсивности перемешивания  $E_k=E_k(t)$ . Очевидно, решение такой задачи не представляет особых затруднений, а вот практическая реализация закона изменения мощности может быть осуществима с большим трудом. Вторая, обратная задача сводится к нахождению решения уравнения (3) для кинетической энергии макродвижения  $E_k = E_k(t)$ . При различных законах изменения мощности перемешивания как функции времени  $N_{nep} = N_{nep}(t)$ . Для обеих задач необходимо в первую очередь определить коэффициент затухания движения среды  $\beta$  и другие параметры, характеризующие диссипативные свойства системы. Один из способов определения параметров затухания, предложенный в работе [6], заключается в следующем. Предположим, что величина  $\beta=const$ , тогда при отсутствии перемешивания  $N_{nep}=0$  закон изменения энергии перемешивания с течением времени имеет вид (4)

$$E_k = E_o e^{-\beta t}, \quad (4)$$

где  $E_o$  – кинетическая энергия перемешивания в начальный момент времени, задается начальными условиями перемешивания. Величина, обратная  $\beta$ , представляет собой некоторое характерное время затухания (время релаксации) системы  $\tau=1/\beta$ .

В опытах по определению коэффициента затухания  $\beta$  на физической модели в качестве

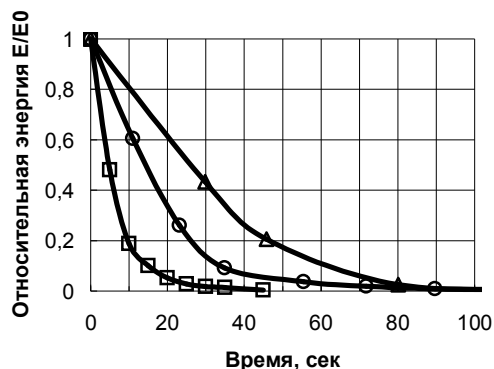


Рис. 1 – Кривые изменения относительной кинетической энергии системы с течением времени.

□ – ламинарный режим перемешивания,  $m = 0,3$  кг, ○ – переходный режим,  $m = 2,5$  кг, Δ – турбулентный режим,  $m = 4,5$  кг

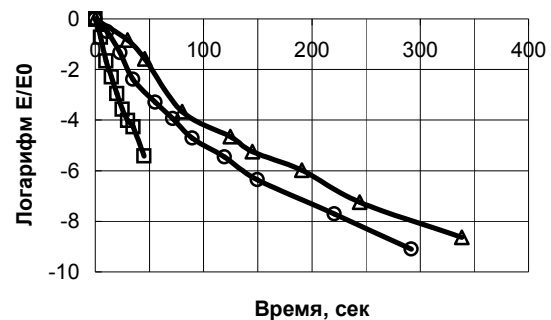


Рис. 2 – Логарифмические кривые изменения относительной кинетической энергии системы с течением времени.

□ – ламинарный режим перемешивания,  $m = 0,3$  кг, ○ – переходный режим,  $m = 2,5$  кг, Δ – турбулентный режим,  $m = 4,5$  кг

исследуемой жидкости использовалась вода в стеклянном сосуде, т.к. ее вязкость при комнатной температуре близка к вязкости стали при температуре  $1500 - 1600$  °C. Перемешивание осуществлялось путем вращения жидкости механическим и магнитным способом. С помощью видеосъемки измерялась угловая скорость движения частиц и определялось изменение кинетической энергии вращательного движения с течением времени для различных масс. Анализ кривых на рисунке 1 подтверждает вывод о том, что кинетическая энергия системы изменяется экспоненциально с течением времени в соответствии с формулой (4). При этом  $\beta$ , как следует из анализа логарифмических кривых на рисунке 2, зависит не только от массы жидкости, но и от режима перемешивания. Приближенные формулы, с помощью которых можно определить время релаксации после прекращения подвода к ней энергии перемешивания, могут в дальнейшем использоваться в реальных случаях:  $\tau(\text{турб}) =$

3,7m (с) – время затухания для турбулентного режима,  $\tau(\text{пер}) = 9,2\text{m}$  (с)– время затухания для переходного режима,  $\tau(\text{лам}) = 13\text{m}$  (с)– время затухания для ламинарного режима.

При подводе постоянной мощности перемешивания  $N_{\text{неп}}=N_0=\text{const}$  и в предположении  $\beta=\text{const}$ , закон изменения энергии перемешивания с течением времени в соответствии с уравнением (5).

$$E_{\kappa} = \frac{1}{\beta} \left[ N_0 - (N_0 - \beta E_0) e^{-\beta t} \right] \quad (5)$$

Как видно, в течение некоторого характерного времени устанавливается определенный режим перемешивания с асимптотическим значением энергии  $E_a = N_0/\beta$ . Вводя относительную энергию  $\varepsilon = E_{\kappa}/E_a$ , безразмерное время  $t_{\text{бм}} = t/\tau$  и безразмерный параметр  $\varepsilon_0 = E_0/E_a$ , формулу (5) преобразуем к универсальному виду (6)

$$\varepsilon = 1 + (\varepsilon_0 - 1) e^{-t_{\text{бм}}} \quad (6)$$

Полученная зависимость приведена на рисунке 3 для различных значений параметра  $\varepsilon_0$ . Очевидно, процесс установления стационарного режима перемешивания при любых значениях начальной кинетической энергии соответствует величине  $t_{\text{бм}}=4$ .

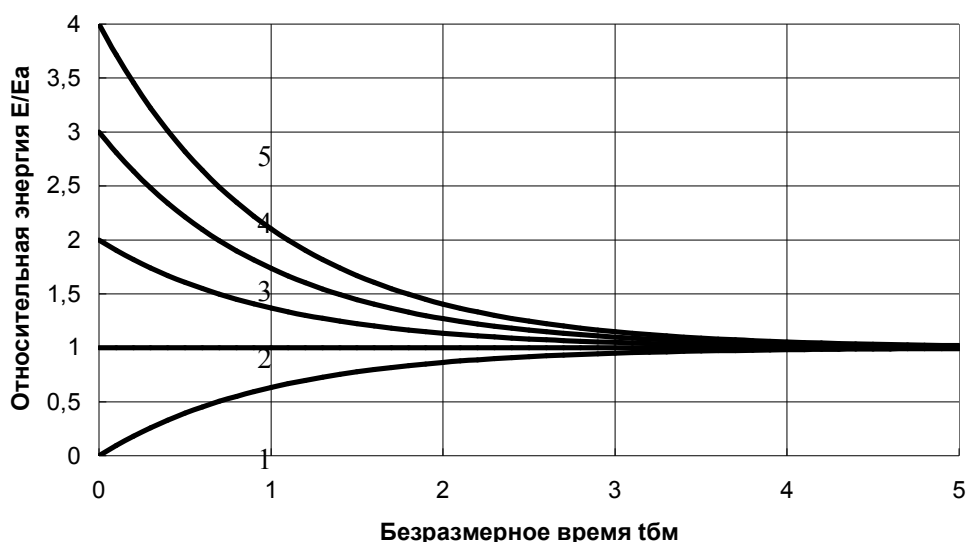


Рис. 3 – Изменение относительной кинетической энергии системы с течением времени при ее вынужденном перемешивании с постоянной мощностью.

Цифры у кривых – значения безразмерного параметра  $\varepsilon_0$

Рассмотрим изменение кинетической энергии расплава в результате внешнего воздействия с переменной мощностью, например, по синусоидальному закону  $N_{\text{неп}}=N_0+X\sin\omega t$ . Интенсивность перемешивания по-прежнему определяется величиной кинетической энергии  $E_{\kappa}$  в соответствии с уравнением (6)

$$\frac{dE_{\kappa}}{dt} + \beta E_{\kappa} = N_0 + X \sin \omega t, \quad (6)$$

решение которого представляет собой сумму общего решение уравнения (6) в виде (7)

$$E_{\kappa}^{\text{общ}} = \frac{N_0}{\beta} + (E_0 - \frac{N_0}{\beta}) e^{-\beta t} \quad (7)$$

и частного решения (8)

$$E_{\kappa}^{\text{частн}} = \frac{X\omega}{\beta^2 + \omega^2} e^{-\beta t} + \frac{X(\beta \sin \omega t - \omega \cos \omega t)}{\beta^2 + \omega^2} \quad (8)$$

Таким образом, колебания мощности приводят к осцилляциям энергии перемешивания, накладываемым на установившийся режим перемешивания. Такого рода колебания возможны, например, при выращивании кристаллов методом Чохральского, при вибрационном воздействии на кристаллизующийся слиток и т.п. При наличии в системе собственных колебаний определенной частоты внешнее воздействие приведет к резонансным явлениям в расплаве, что может представлять особый интерес для дальнейших исследований и приложений.

#### *Выводы*

1. На основании закона сохранения энергии получены аналитические выражения, позволяющие оценить влияние постоянной и переменной мощности внешнего воздействия на интенсивность перемешивания жидкого металла при кристаллизации слитков и отливок.
2. Учет мощностей перемешивания и диссипации позволил в исследованиях найти зависимость кинетической энергии расплава от времени при различных видах естественного и вынужденного движения расплава.
3. Разработана методика экспериментального определения коэффициентов затухания и времени релаксации системы в зависимости от внешнего воздействия. Методика апробирована на физической модели при ламинарном, переходном и турбулентном режиме течения.

#### *Перечень ссылок*

1. *Скребцов А.М.* Конвекция и кристаллизация металлического расплава в слитках и отливках / *А.М. Скребцов.* – М.:Металлургия,1993. – 144 с.
2. *Ефимов В.А.* Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов / *В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов.* – М.: Машиностроение, 1998. – 360 с.
3. *Жук В.И.* Возможности учета перемешивания жидкой стали при её охлаждении и кристаллизации / *В.И. Жук* // Материалы 6 Международной научно-технической конференции “Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах” – Мариуполь, 2000. – С. 254 – 258.
4. *Капустин Е.А.* Роль переноса вещества и энергии в ваннах сталеплавильных агрегатах / *Е.А. Капустин* // Вопросы теории и практики сталеплавильного производства. – М.: Металлургия, 1991. – С. 14 – 23.
5. *Жук В.И.* Энергия и мощность перемешивания расплава при затвердевании металла / *В.И. Жук* // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Мариуполь, 2007. – Вип. № 17. – С. 73 – 77.
6. *Жук В.И.* Определение параметров перемешивания подвижных сред / *В.И. Жук, С.А. Липунов, М.Д. Жук* // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции “Университетская наука 2008”. – Мариуполь, 2008. – С. 148 – 149.

Рецензент: А.М. Скребцов  
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 23.02.2009