

**Александров С. Ю.**  
**S. Yu. Aleksandrov**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ  
КРИСТАЛЛИЗАТОРА УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ  
ПРИ СВОБОДНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ ПОГРУЖНОМ СТАКАНЕ**

**MODELING OF THE PROCESS OF FILLING WITH LIQUID METAL OF A CONTINUOUS  
STEEL CASTING INSTALLATION CRYSTALLIZER WITH A FREE-BOUNDARY  
ROTATING SUBMERSIBLE TANK**

**Александров Сергей Юрьевич** – старший преподаватель кафедры «Проектирование, управление и разработка информационных систем» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Sergei Yu. Aleksandrov** – Senior Lecturer, Design, Management and Development of Information Systems Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: sandrov@mail.ru.

**Аннотация.** В работе предложена модель процесса разлива стали в кристаллизаторе УНРС при его подаче из вращающегося погружного стакана.

**Summary.** The paper proposes a model of the process of casting steel in a UNRS mold when it is fed from a rotating submerged tank.

**Ключевые слова:** численное моделирование, жидкий металл, вращающийся погружной стакан, установка непрерывной разливки стали, заполнение, кристаллизатор.

**Key words:** numerical simulation, liquid metal, rotating submersible tank, continuous casting plant, filling, crystallizer.

УДК 519.677

Работа выполнена под руководством доктора технических наук доцента Э. А. Дмитриева и доктора технических наук профессора В. И. Одинокова.

Известно, что чем интенсивнее и равномернее потоки металла в объёме кристаллизатора, тем мельче получаемое при кристаллизации зерно металла и эффективнее процесс теплоотвода через стенки кристаллизатора. Данная проблема отражена в многочисленных публикациях и патентах, в которых описываются различные способы и устройства подачи жидкого металла в кристаллизатор установки непрерывной разливки стали (УНРС) [1–3]. При этом для ряда способов подачи жидкого металла в кристаллизатор уже построены математические модели, позволяющие по движущемуся жидкому металлу в объёме кристаллизатора оценить эффективность того или иного устройства, с помощью которого осуществляется данный процесс [4–9].

Суть предлагаемого нового способа подачи металла в кристаллизатор состоит в следующем (см. рис. 1). Жидкий металл из ковша 1 через погружной прямоточный стакан 2 поступает в плавающий глуходонный стакан 3 квадратного поперечного сечения, откуда через эксцентриковые окна 4 выходит в кристаллизатор 5. Выходящие из эксцентриковых окон струи жидкого металла создают вращательный момент, приводящий в движение (вращение) плавающий глуходонный стакан.

Вследствие вращения глуходонного стакана струи жидкого металла будут создавать эффект перемешивания, которое дополнительно усиливается от вращения квадратных граней (см. рис. 1, а). Имеем квазистационарный процесс, повторяющийся при повороте квадратного стакана на 180° при кристаллизаторе прямоугольного сечения, и на 90° при кристаллизаторе квадратного попе-

речного сечения. Будем рассматривать процесс подачи металла в кристаллизатор прямоугольного поперечного сечения.

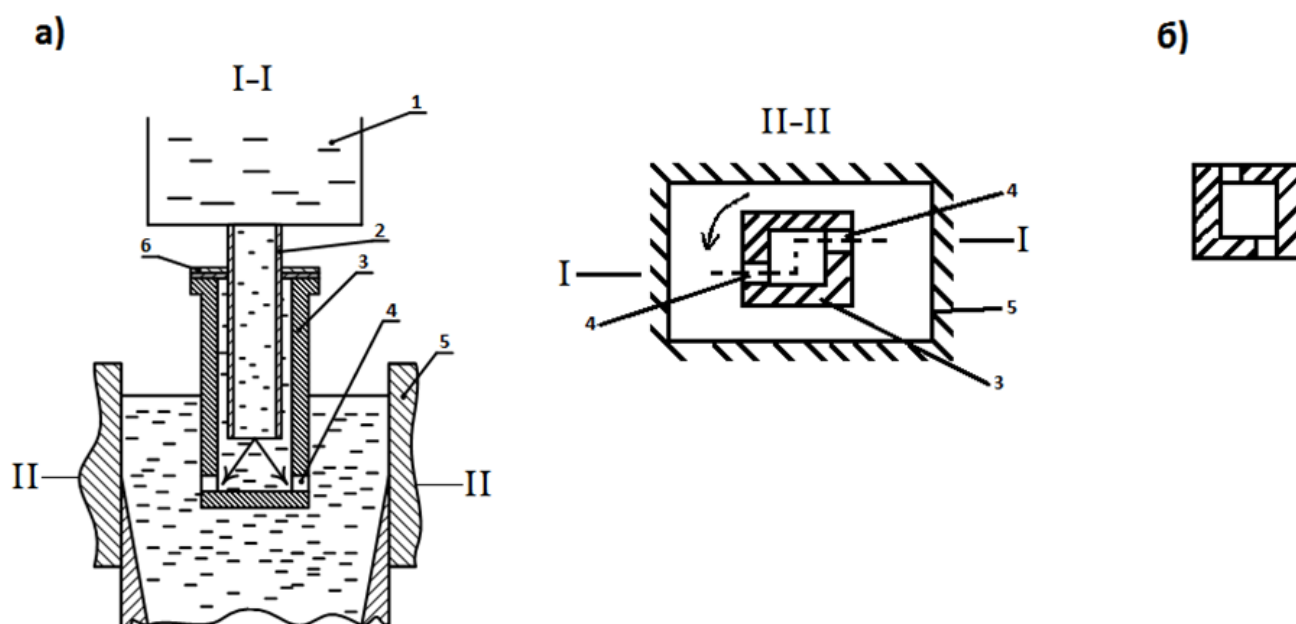


Рис. 1. Схема процесса разливки жидкого металла в кристаллизатор:  
а – общий вид устройства с разрезом; б – при повороте погружного стакана на  $90^\circ$

На рис. 2 отображена схема вращения стакана квадратного поперечного сечения в плоскости ( $x_2$   $x_3$ ). Очевидно, что  $cd = c'd' = cc' = dd' = d$ . Возьмём произвольную точку  $b$  на стороне квадрата  $cd$ . При заданном направлении вращения квадрата со скоростью  $V$  имеем

$$\begin{aligned}
 V_t &= -V \cdot \sin \alpha, \\
 \sin \alpha &= \frac{O'b}{r}, \\
 V &= \frac{\pi \cdot r \cdot n}{30}, \\
 V_t &= -\pi n \frac{x_2}{30},
 \end{aligned} \tag{1}$$

где  $n$  – число оборотов, об/мин;  $x_2 = O'b$ .

Очевидно, формула (1) верна для поверхностей Г6. Для поверхностей Г5 имеем

$$V_t = \pi n \frac{x_3}{30}. \tag{2}$$

В течение поворота стакана на  $180^\circ$  процесс будет нестационарным. При этом из окон стакана в нижней его части выходит жидкий металл со скоростью  $V_M$ . Будем считать, что поперечные сечения окон равны. Процесс очень сложен даже при использовании численных методов.

Квадрат в горизонтальном сечении вращается вокруг центра  $O$  (см. рис. 2). При заданном направлении вращения одна половина грани квадрата  $O'c$  как бы выталкивает жидкий металл от себя наружу, а вторая половина грани  $O'd$  втягивает металл в противоположном направлении. То же самое происходит и с другими гранями квадрата. В этом смысле можно интерпретировать данный процесс как выход металла из участка грани  $O'c$  со скоростью  $V_t$  по формуле (1) и вход того

же объёма металла в участок грани  $o'd$  также со скоростью по формуле (1). Аналогичную интерпретацию движения металла можно применить и к другим граням квадрата с использованием формул (1), (2).

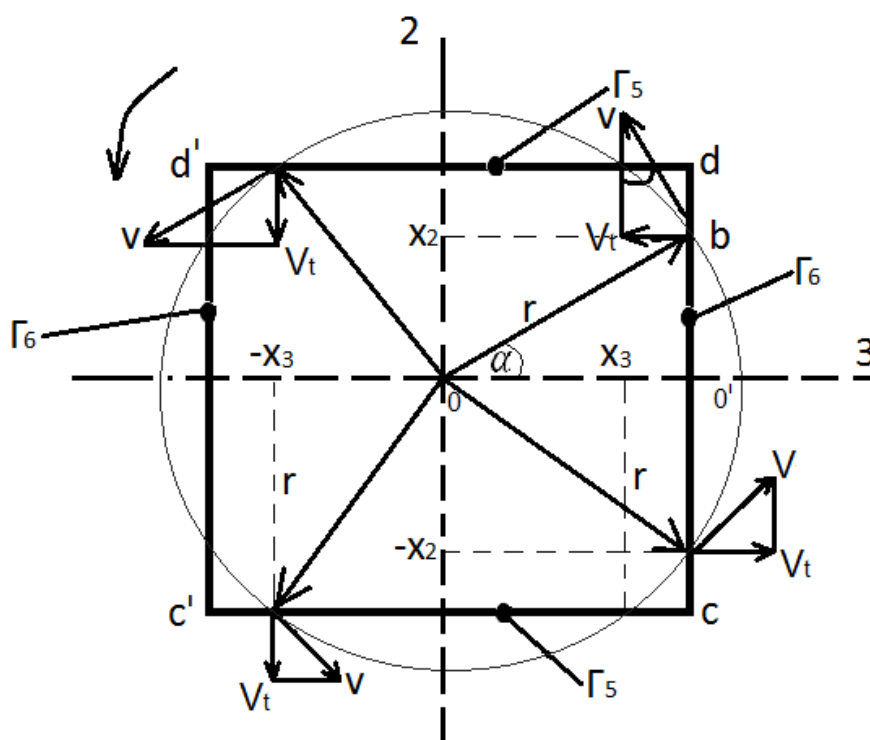


Рис. 2. Схема вращения погружного стакана квадратного поперечного сечения

Таким образом, будем считать погружной стакан квадратного поперечного сечения неподвижным, при этом через его грани втекает и вытекает металл со скоростями  $V_i$ , согласно формулам (1), (2). Это не касается окон стакана, из которых жидкий металл поступает в кристаллизатор со скоростью  $V_M$ . При этом будем рассматривать два положения квадратного стакана, повернутых друг относительно друга на  $90^\circ$  (см. рис. 1, а, б).

Вычисленные потоки металла в этих двух положениях стакана дадут представление и о течении металла в кристаллизаторе, когда стакан повернётся относительно первого положения (см. рис. 1, а) на  $45^\circ$ .

Такая идеализация позволяет рассматривать данный процесс как стационарный, что значительно облегчает его постановку и решение. Кроме того, не будем учитывать появляющуюся на гранях кристаллизатора корочку затвердевшего металла.

При таком технологическом процессе перемешивание жидкого металла в кристаллизаторе происходит интенсивнее, чем при процессе выхода металла в кристаллизатор из погружного стакана [8], но без вращения.

Дополнительное принудительное перемешивание металла позволит значительно повысить однородность металла по всему объёму кристаллизатора, а значит, качество и свойства формируемых заготовок.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дюдкин, Д. А. Производство стали. В 4 т. Т. 4. Непрерывная разливка металла / Д. А. Дюдкин, В. В. Кисиленко, А. И. Смирнов. – М.: Теплотехник, 2008. – 528 с.
2. Ефимов, В. А. Разливка и кристаллизация стали / В. А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
3. Intern Symposium on Electromagnetic Processing of Materials. October 25-28, 1994. Nagoya, Japan: ISIJ, 1994, 580 p.

4. Разработка нового способа разлива слэбовых заготовок на МНЛЗ / В. В. Стулов, В. А. Матысик, Т. В. Новиков, С. В. Щербаков, И. В. Чистяков, А. П. Плотников. – Владивосток: Дальнаука. 2008. – 156 с.
5. Одинок, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металла кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одинок, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2019. – № 10. – С. 747-755.
6. Одинок, В. И. Математическое моделирование процесса течения металла в кристаллизаторе при его подаче из погружного стакана с эксцентричными отверстиями / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2018. – № 8. – С. 606-612.
7. Одинок, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2017. – № 6. – С. 493-498.
8. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК В22D 11/10. Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разлива стали через погружной прямоточный стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018: опубликовано 21.02.2020 / Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; патентообладатель ФГБОУ ВО «КнАГУ». – 5 с.
9. Горнаков, А. И. Математическое моделирование процесса течения металла при новом способе непрерывной разлива стали / А. И. Горнаков // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2012. – № III-1 (11). – С. 47-51.
10. Александров, С. Ю. Совершенствование устройств по подаче и перемешиванию жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного разлива стали / С. Ю. Александров, А. А. Хусаинов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 113-116.