

УДК 621.9.048:669.295

**А. И. Глухенький, Ю. М. Гориславец, А. И. Бондар,  
С. В. Ладохин\*, Т. В. Лапшук\*, Е. А. Дрозд\***

Институт электродинамики НАН Украины, Киев

\*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ТИТАНА В ГАРНИСАЖНЫХ ТИГЛЯХ

*Разработана математическая модель для расчетного исследования электронно-лучевой плавки в гарнисажном тигле, которая путем совместного решения стационарных электромагнитных, гидравлических и тепловых задач позволяет выйти при заданном режиме работы электромагнитного перемешивателя на соответствие между положением границы гарнисажа и минимальной мощностью электронно-лучевого нагрева, необходимой для достижения данного положения. Модель апробирована на тестовой задаче. Приведены результаты расчетов для гарнисажного тигля с донным сливом 50 кг расплава титана.*

**Ключевые слова:** гарнисажный тигель, расплав титана, электромагнитное перемешивание расплава, мультифизическое моделирование.

*Розроблено математичну модель для розрахункового дослідження електронно-променевої плавки в гарнісажному тиглі, яка шляхом спільного вирішення стаціонарних електромагнітних, гідравлічних і теплових задач дозволяє вийти при заданому режимі роботи електромагнітного перемішувача на відповідність між положенням границі гарнісажу і мінімальною потужністю електронно-променевого нагріву, необхідною для досягнення даного положення. Модель апробована на тестовій задачі. Наведено результати розрахунків для гарнісажного тигля з донним зливанням 50 кг розплаву титану.*

**Ключові слова:** гарнісажний тигель, розплав титану, електромагнітне перемішування розплаву, мультифізичне моделювання.

*Developed mathematical model for the design research of electron beam melting in the skull crucible, which by joint decision of the stationary electromagnetic, hydraulic and thermal tasks allows to exit on given mode of operation of the electromagnetic stirring in the correspondence between the position of the skull border and minimum power of electron beam heating required to achieve this provision. The model was tested on the test problem. The calculation results for the skull crucible with a bottom pouring of 50 kg titanium melt.*

**Keywords:** skull crucible, titanium melt, electromagnetic stirring of the melt, multiphysics modeling.

### Введение

**В** настоящее время в электронно-лучевых литейных установках для выплавки сплавов используются гарнисажные тигли с системами электромагнитного перемешивания расплава (СЭМП), применение которых позволило успешно решить

задачу получения литых заготовок и изделий из тугоплавких металлов и сплавов на их основе, в том числе титана [1]. Используемые до последнего времени тиглы обеспечивали выплавку ограниченной массы расплава – 20-30 кг по титану. И только в 2013 г. была успешно запущена в эксплуатацию первая электронно-лучевая литейная установка с гарнисажным тиглем, обеспечивающим слив (через отверстие в днище) около 50 кг расплава титана. В то же время развитие современной техники требует получения существенно больших масс расплава для производства крупногабаритных литых изделий, что обуславливает необходимость разработки тиглей повышенной емкости.

Ввиду сложности и дороговизны проведения физических экспериментов в настоящее время наиболее распространенным и рациональным подходом при разработке новых электротехнологических устройств является использование методов математического моделирования. Применительно к электронно-лучевой гарнисажной плавке это моделирование может быть осуществлено путем совместного численного решения электромагнитных, гидродинамических и тепловых задач. Данный подход в последнее время успешно применяется при разработке металлургического оборудования различной конструкции и предназначения, в которых используется электромагнитное перемешивание металлических расплавов [2, 3].

*Целью данной работы* является разработка и апробация математической модели для расчетного исследования мультифизических процессов при электронно-лучевой гарнисажной плавке с электромагнитным перемешиванием.

*Математическая модель и ее апробация.* При достаточно высоком достигнутом уровне вычислительной техники и наработанных расчетных подходах при численном моделировании расчет нестационарных задач с движущимся фронтом кристаллизации до сих пор остается сложной и не всегда решаемой задачей. Поэтому с целью упрощения, несмотря на сугубо нестационарный характер электронно-лучевой тигельной плавки, электромагнитные, гидродинамические и тепловые процессы предложено рассматривать для установившегося состояния.

Как известно, в установившемся тепловом состоянии мощность на нагрев и плавление не расходуется, и энергетический баланс устанавливается за счет равенства мощностей, поступающих в металл от электронно-лучевой пушки и СЭМП и отводимых испарением и излучением с зеркала металла и теплоотдачей к воде в секциях тигля. При этом заданным мощностям пушки и СЭМП соответствует вполне определенное положение границы между жидкой и твердой фазой загрузки титана. Следовательно, расчет стационарных задач при плавке позволяет обойтись без сложного и громоздкого рассмотрения процессов фазового перехода с подвижным фронтом кристаллизации и, в то же время, непосредственно выйти при заданном режиме работы СЭМП на соответствие между положением границы гарнисажа и минимальным значением мощности электронно-лучевого нагрева, необходимой для достижения данного положения. Такой результат является весьма важной информацией при оценке эффективности той или иной конструкции тигля или перемешивателя.

В соответствии с разработанным расчетным алгоритмом границу жидкой и твердой фазы загрузки титана в тигле предложено определять путем последовательного приближения. Сначала под фокальным пятном электронного луча задается исходный малый объем жидкого металла. Далее последовательно рассчитываются стационарные электромагнитная, гидродинамическая и тепловая задачи: в электромагнитной – определяются объемные электромагнитные силы, приводящие в движение жидкий металл, а также тепловыделения от вихревых токов в тигле, гарнисаже и жидком металле; в гидродинамической – устанавливаются структура течения и распределение скоростей в объеме расплава; в тепловой – определяется распределение температуры с учетом теплообмена за счет массопереноса при движении расплава. В результате расчета получается новая граница твердой и жидкой фазы, которой считается изотермическая поверхность с температурой плавления титана. Далее за-

дается полученная новая область расплава, и процесс пересчета повторяется до тех пор, пока положения фронта кристаллизации (заданное и полученное) не совпадут.

Предложенный алгоритм апробирован на тестовой задаче определения положения фронта кристаллизации при наличии термогравитационного течения: рассматривается объем олова с температурой плавления  $T_{пл} = 505$  К, который располагается между боковыми стенками с температурой стенки слева 508 К, справа – 503 К. Нижняя и верхняя границы объема теплоизолированы. Для данного случая известно численное решение связанных нестационарных гидродинамической и тепловой задач, найденное с использованием достаточно сложного интерфейса движущейся расчетной сетки [4], которое хорошо согласуется с полученными экспериментальными результатами по движению фронта кристаллизации [5].

В качестве иллюстрации предложенного расчетного алгоритма по определению положения фронта кристаллизации в установившемся тепловом режиме на рис. 1 представлены результаты первой (а), промежуточной (б) и последней (в) расчетной итерации.

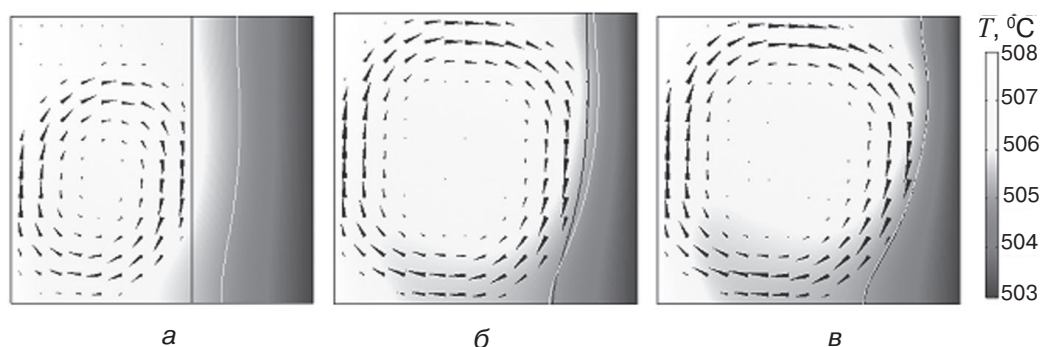


Рис. 1. Начальное (а), промежуточное (б) и конечное (в) положение фронта кристаллизации

На рис. 1 темной линией обозначена первоначально заданная граница жидкой и твердой фазы олова, а светлой – полученная после гидродинамического и теплового расчетов изотерма с  $T_{пл} = 505$  К. Видно, что на последней итерации обе линии практически совпадают. Сопоставление результатов, представленных на рис. 1, с результатами для установившегося состояния, полученными в решении [5] и представленными на рис. 2, указывает на их практически полное совпадение как в части распределения температуры во всем объеме олова, так и скорости движения расплава.

Таким образом, расчетным путем подтверждено, что предложенный подход может быть использован для определения положения фронта кристаллизации в установившемся режиме. Преимуществами такого алгоритма является простота и эко-

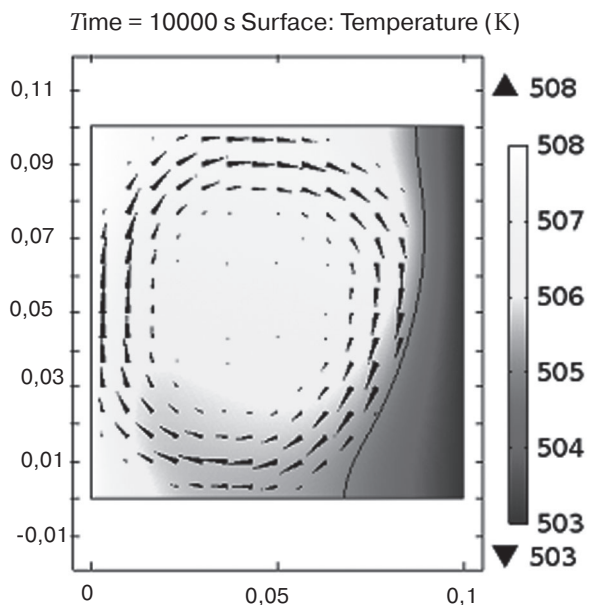


Рис. 2. Результат расчета методом движущейся сетки

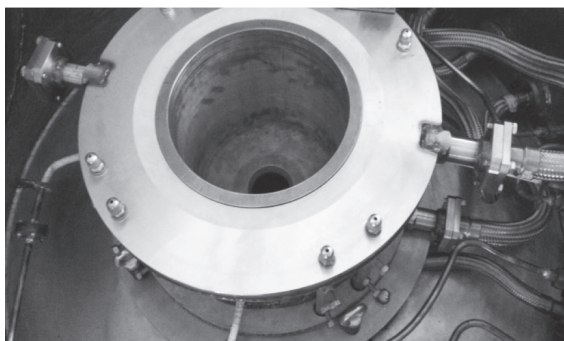
номичность его реализации, что особенно важно на начальном этапе проведения расчетных исследований, когда для выявления основных физических закономерностей процесса необходимо проведение большого количества вариантных расчетов.

Апробация предложенного расчетного алгоритма применительно к технологии электронно-лучевой плавки с электромагнитным перемешиванием в гарнисажном тигле выполнялась на примере экспериментально опробованного тигля с донным сливом для получения около 50 кг жидкого титана. Данный тигель разработан ООО «КБ ВМО» по техническому заданию Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины для фирмы «Yuanda Chengli» (КНР) [6]. Общий вид медного водоохлаждаемого тигля с двухкатушечной СЭМП в смонтированном состоянии и его конструктивная схема с габаритными размерами приведены на рис. 3. Для обеспечения возможности проникновения магнитного поля вглубь титановой загрузки боковая стенка тигля выполнена секционированной (по окружности в зоне СЭМП имеет 30 продольных разрезов). Общая масса титана в тигле при уровне расплава на 50 мм ниже верхнего среза боковой стенки составляет 65 кг. Плавка в тигле осуществляется электронно-лучевой пушкой мощностью 300 кВт.

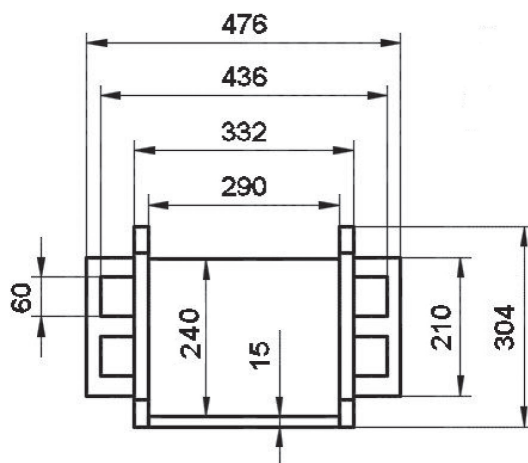
С основными расчетными уравнениями математической модели для численного исследования стационарных электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов можно ознакомиться, например, в работе [3]. Ниже остановимся на особенностях модели и основных упрощающих допущениях с учетом специфики электронно-лучевой гарнисажной плавки.

Несмотря на осесимметричную форму электромагнитного перемешивателя и тигля, наличие в боковой стенке последнего прорезей предопределяет сугубо трехмерный характер растекания вихревых токов в секциях тигля и, соответственно, требует решения трехмерной электромагнитной задачи. В расчетах не учитывалось наличие точечных электрических контактов между тиглем и гарнисажем. В качестве исходных данных, определяющих производительность перемешивателя, использовались ампер-витки его катушек. В двухкатушечной СЭМП фазовый сдвиг между токами катушек составлял 90 эл. град. Реверс направления движения бегущего магнитного поля осуществлялся изменением угла сдвига фаз на противоположный (с положительного на отрицательный).

Гидродинамическая задача рассчитывалась для вязкого турбулентного течения с использованием  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. На границе гарнисажа задавались условия в виде логарифмического профиля скорости для пограничного слоя, на



а



б

Рис. 3. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) тигля с донным сливом для выплавки 50 кг расплава титана

верхней (свободной) поверхности жидкого металла принималось условие скольжения. Мениск на свободной поверхности не учитывался. Движение на поверхности от центра к периферии получило условное название прямого (пр.), а от периферии к центру – обратного (обр.).

При проведении тепловых расчетов предполагалось, что тепло подводилось в титан равномерно через осесимметричную поверхность диаметром приблизительно равным 10 % внутреннего диаметра тигля. Мощность теплового потока, поступающего на нагрев и плавление титана, принималась равной 75 % мощности ЭЛП.

Удельный тепловой поток с поверхности зеркала титана за счет излучения учитывался в соответствии с выражением:

$$P_{\text{изл}} = \xi \sigma (T_{\text{п}}^4 - T_0^4) \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

где  $\xi = 0,7$  – приведенная степень черноты,  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\text{К}^4\text{)}$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $T_{\text{п}}$  – локальная температура поверхности,  $T_0 = 293 \text{ К}$  – температура окружающей среды.

Потеря мощности на испарение титана с зеркала расплава аппроксимировалась степенной функцией

$$P_{\text{изл}} = 72,396 \cdot 10^{-46} \cdot T_{\text{п}}^{14,7979} \text{ [Вт/м}^2\text{]}.$$

Удельный тепловой поток к воде в дне и стенке тигля в первом приближении определялся согласно выражению

$$P_{\text{изл}} = h_{\text{е}} (T_{\text{п}} - T_0) \text{ [Вт/м}^2\text{]},$$

где  $h_{\text{е}}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи (КТО), который интегрально учитывает теплоотдачу к воде в каналах тигля, тепловое сопротивление медных стенок, теплопередачу теплопроводностью и излучением в контактном зазоре между тиглем и гарнисажем. Его значение в основном определяется тепловым сопротивлением контактного зазора и может изменяться в достаточно широких пределах  $h_{\text{е}} = 150\text{-}500 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$ . В каждом конкретном случае значение следует уточнять эмпирическим путем. В случае промыва гарнисажа контактный зазор исчезает и эффективное значение КТО локально может увеличиваться на порядок – до  $1000\text{-}2000 \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$  [7] и более.

Для подобласти расплава титана помимо теплообмена вдоль потока расплава за счет массопереноса учитывалась интенсификация теплообмена во всех направлениях из-за турбулентного характера движения расплава при электромагнитном перемешивании. Учет производился путем ввода эффективного коэффициента теплопроводности  $\lambda_{\text{е}}$ , имеющего молекулярную  $\lambda$  и турбулентную  $\lambda_{\text{т}}$  составляющие

$$\lambda_{\text{е}} = \lambda + \lambda_{\text{т}} \text{ [Вт/(м}\cdot\text{К)}].$$

По оценкам [7] значение турбулентной составляющей при этом может в десятки раз превышать величину коэффициента молекулярной теплопроводности.

Использованные при проведении расчетов значения физических характеристик титана, материалов тигля (медь) и магнитопровода СЭМП (электротехническая сталь) представлены в таблице.

*Обсуждение результатов расчетов.* Существенная неопределенность в значениях параметров, определяющих теплообмен как внутри тигля, так и с его поверхности, предопределяет необходимость проведения в дальнейшем ряда вариантных расчетов по выявлению степени влияния каждого из параметров на тепловое состояние расплава в гарнисажном тигле и определения путем сопоставления с экспериментальными данными более узкого диапазона их вероятных значений. Ниже в рамках

**Значения физических характеристик материалов**

Материал	Удельная электропроводность, См/м	Относительная магнитная проницаемость	Удельная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, Па·с	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Медь	$5,81 \cdot 10^7$	1	–	–	–
Сталь Э12	0	1000	–	–	–
Жидкий титан	$3 \cdot 10^5$	1	4100	0,0052	37
Твердый титан	$6,67 \cdot 10^5$	1	4250	–	27

данной работы представлены в качестве иллюстрации предварительные расчетные результаты, полученные с помощью предложенной математической модели.

На рис. 4 представлены расчетные формы гарнисажа, структуры движения расплава титана и распределение температуры в расплаве и гарнисаже при прямом и обратном направлении движения расплава.

Результаты соответствуют диаметру фокального пятна 30 мм, мощности электронно-лучевого нагрева на поверхности металла 200 кВт, приведенной степени черноты при излучении тепла  $\xi = 0,7$ , десятикратному превышению турбулентной теплопроводности по отношению к молекулярной, эквивалентному коэффициенту теплоотдачи к охлаждающей воде тигля  $h_e = 450$  Вт/(м<sup>2</sup>К).

Как следует из рис. 4, дальнейшее повышение мощности ЭЛП при прямом движении расплава может привести к проплавлению гарнисажа на боковых стенках существенно раньше, чем на дне. В то время как при обратном движении уже незначительного повышения мощности ЭЛП достаточно для первоначального проплавления донного гарнисажа и, тем самым, обеспечения возможности донного слива расплава титана из тигля.

При прямом движении, несмотря на более высокую его интенсивность (средняя по объему расплава скорость движения  $v_{cp} = 0,45$  м/с) по отношению к обратному ( $v_{cp} = 0,35$  м/с), отношение жидкой фазы к общей массе титана будет ниже – 0,63 и 0,67, соответственно. Определяющим здесь является направление движения бегущего магнитного поля, которое обеспечивает индуктор СЭМП.

Джоулевые тепловыделения при электромагнитном перемешивании не оказывают существенного влияния на тепловое состояние тигля с титаном при электронно-лучевой плавке. Потери от вихревых токов в гарнисаже и расплаве относительно невелики (соответственно составляют при прямом движении 11,2 и 2,1 кВт, обратном – 11,6 и 2,0 кВт), что суммарно составляет менее 7 % мощности электронно-лучевого нагрева. Потери в тигле, которые составляют порядка 24 кВт, также не ведут к заметному изменению температуры в титане, поскольку данный тепловой поток напрямую передается в воду (минуя контактный воздушный промежуток). При суммарных ампер-витках 30000 А потери в катушках будут 12,6 кВт, а общие затраты активной мощности электромагнитным перемешивателем составят порядка 50 кВт.

Средняя по объему расплава титана температура будет несколько ниже в случае обратного движения.

При обратном движении потеря мощности на испарение составляет 9,9 кВт (испарение титана 1,1 г/с), на излучение – 36,9 кВт, к тиглю – 166,8 кВт (78 %). Максимальная температура в фокальном пятне – 3090 К.

Расчетным путем выявлена также существенная зависимость теплового состояния тигля от размера фокального пятна электронного луча. На рис. 5 представлены граничные области расплава и гарнисажа, позволяющие осуществить донный слив расплава при обратном движении (а), и необходимая для этого мощность луча в зависимости от размера фокального пятна (б). Данные получены без учета турбулентной

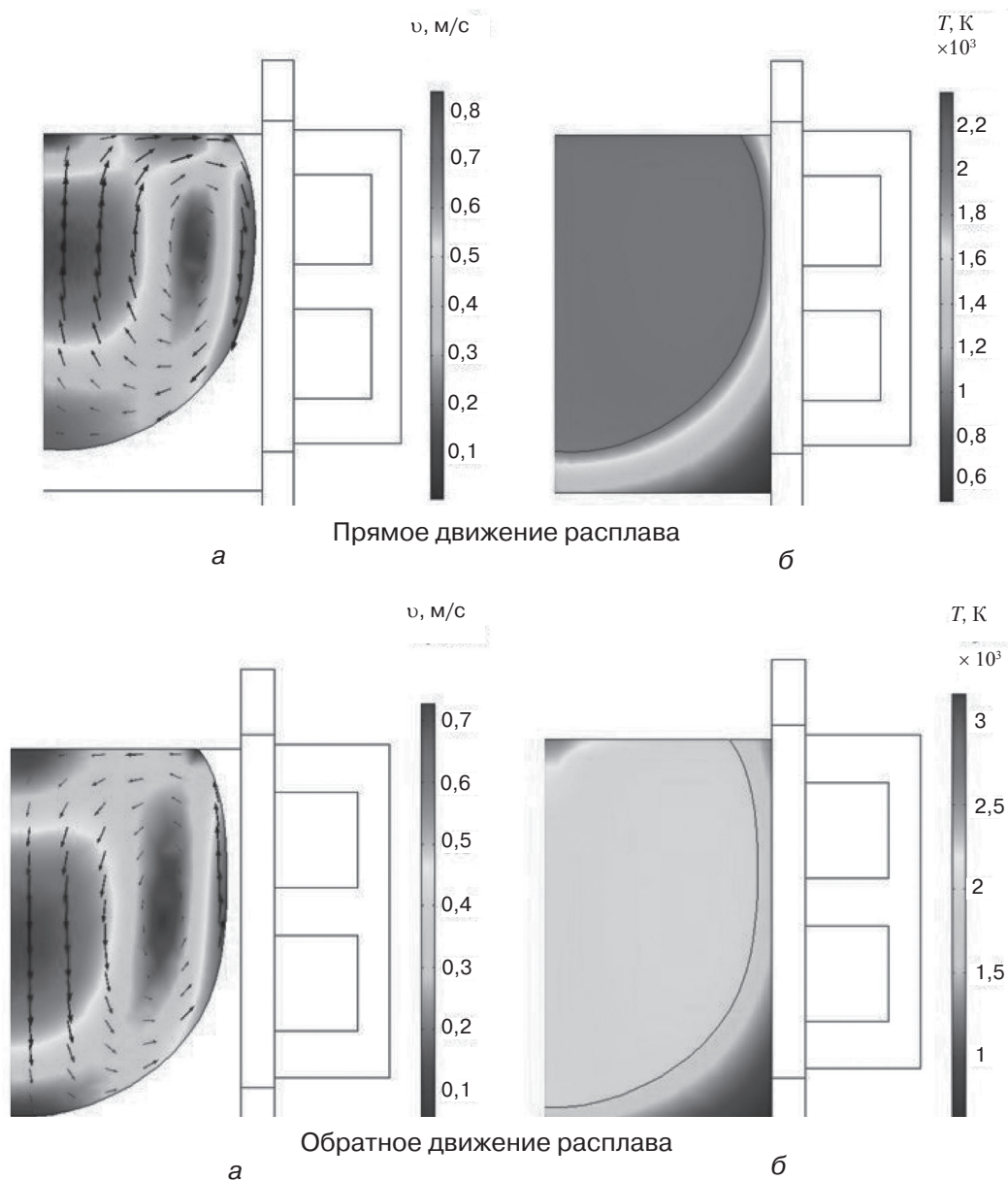


Рис. 4. Гарнисаж, структура движения расплава (а) и распределение температуры в расплаве и гарнисаже (б) при прямом и обратном направлении движения расплава в тигле диаметром 290 мм

составляющей теплопроводности расплава титана ( $\lambda_t = 0$ ). Значение эквивалентного коэффициента теплоотдачи к охлаждающей тигель воде принималось равным  $h_c = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ . Видно, что существует критическое значение радиуса луча (1,5-2 см), с уменьшением ниже которого требуемая мощность стремительно растет. Так, при радиусе в 1 см она составляет 2000 кВт, в то время как при радиусе больше 3 см для обеспечения донного слива будет достаточно мощности в 100 кВт.

В заключение следует отметить, что, несмотря на в значительной степени качественный характер проведенных расчетов, они подтвердили экспериментально подтвержденные тенденции при электронно-лучевой плавке титана в гарнисажном

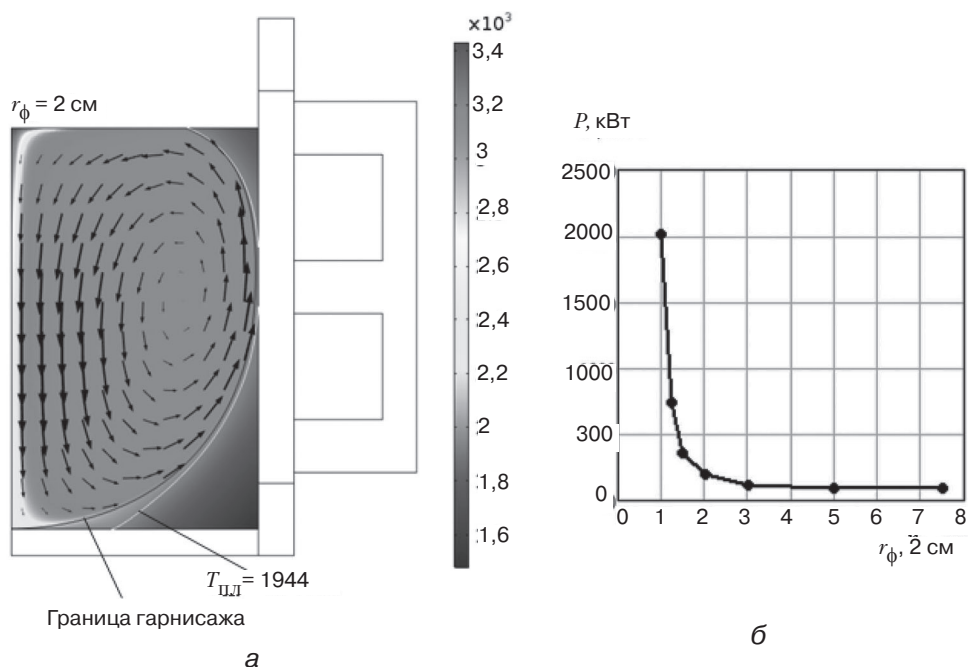


Рис. 5. Гарнисаж, структура движения расплава и распределение температуры при мощности  $P = 195 \text{ кВт}$  (а) и зависимость мощности ЭЛП от радиуса фокального пятна для заданного гарнисажа (б)

тигле с электромагнитным перемешиванием расплава, а именно, что для обеспечения донного слива необходима организация обратного направления движения расплава в тигле.

Дальнейшее повышение точности и достоверности расчетов может быть достигнуто за счет уточнения эмпирически определяемых параметров теплообмена при плавке в секционированном тигле с электромагнитным перемешиванием расплава.



## Список литературы

1. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве / Под ред. С. В. Ладохина. – К.: Сталь, 2007. – 626 с.
2. Подольцев А. Д., Кучерявая И. Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 3-15.
3. Дубоделов В. И., Фикссен В. Н., Гориславец Ю. М., Глухенький А. И., Бондар А. И. Моделирование электромагнитного перемешивания металлических расплавов под воздействием пульсирующего и бегущего магнитных полей // Процессы литья. – 2016. – № 4. – С. 3-9.
4. Tin Melting Front, application ID: 6234, Comsol Multiphysics reference manual.
5. Wolff F., Viskanta R. Solidification of a Pure Metal at a Vertical Wall in the Presence of Liquid Super heat // Int.J. Heat and Mass Transfer, vol. 31, № 8, pp. 1735-1744, 1988.
6. Ладохин С. В. Электронно-лучевые установки нового поколения: конструктивные особенности и области применения // Процессы литья. – 2013. – № 4. – С. 56-70.
7. Волохонский Л. А. Вакуумные дуговые печи. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.





## References

1. *Ladokhin S. V.* (ed.) (2007) Elektronno-luchevaya plavka v liteynom proizvodstve [Electron- beam melting in foundry]. K.: Stal, 626 p. [in Russian].
2. *Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N.* (2015) Multifizicheskoe modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv [Multiphysical modeling of electrical devices]. *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 2, pp. 3-15. [in Russian].
3. *Dubodelov V. I., Fikssen V. N., Gorislavec Ju. M., Gluhen'kij A. I., Bondar A. I.* (2016). Modelirovanie elektromagnitnogo peremeshvaniya metallicheskich rasplavov pod vozdeystviem pulsiruyushchego i begushchego magnitnykh poley [Modeling of electromagnetic stirring of metallic melts on influence of pulsate and travelling magnetic fields]. *Protsessy litya*, no. 4, pp. 3-9. [in Russian].
4. Tin Melting Front, application ID: 6234, Comsol multiphysics reference manual. [in English].
5. *Wolff F., Viskanta R.* (1988) Solidification of a pure metal at a vertical wall in the presence of liquid superheat // *Int. J. Heat and Mass Transfer*, vol. 31, no. 8, pp. 1735-1744. [in English].
6. *Ladokhin S. V.* (2013). Elektronno-luchevye ustanovki novogo pokoleniya: konstruktivnye osobennosti i oblasti primeneniya [Electron beam installation of the new generation: design peculiarities and fields of application]. *Protsessy litya*, no. 4, pp. 56-70. [in Russian].
7. *Volohonskij L. A.* (1985). *Vakuumnnye dugovye pechi*. [Vacuum arc furnaces]. Moscow: Energoatomizdat, 232 p. [in Russian].

Поступила 19.01.2017