

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ТА ЕНЕРГЕТИЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.74.047:004.94

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХВАЛКОВОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ПОДАЧИ МЕТАЛЛА

А.В. Ноговицын¹, докт. техн. наук, **А.Д. Подольцев²**, докт. техн. наук, **И.Н. Кучерявая³**, докт. техн. наук

1 – Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины,

бул. Академика Вернадского, 34/1, Киев, 03680, Украина

2, 3 – Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Разработаны трехмерная математическая модель и компьютерная методика по расчету течения расплавленного металла в межвалковом канале двухвалкового кристаллизатора при вертикальной подаче металла через целевой питатель и насадку различных вариантов. С использованием метода конечных элементов в программе Comsol проведены комплексные компьютерные расчеты. По результатам компьютерного моделирования изучены особенности течения металла в объеме кристаллизатора, среди которых роль краевых эффектов, замкнутые вихревые структуры течения расплава в центральных областях межвалкового зазора и в широкой насадке. Библиограф. 8, рис. 6, таблица.

Ключевые слова: валковая разливка-прокатка, трехмерное компьютерное моделирование, ламинарное течение, поле скорости, давление, циркуляция расплава.

Во многих современных технологиях получения высококачественных металлов и сплавов реализуется воздействие электромагнитного поля на расплав. К примеру, в валковых кристаллизаторах осуществляется электромагнитное формирование боковой поверхности жидкого металла между валками путем создания у их торцов электромагнитных сил [1, 2]. Для обеспечения рационального электромагнитного воздействия на жидкий металл требуется совместное рассмотрение электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов. При этом характер гидродинамических течений в технологических процессах непрерывного литья является определяющим для надлежащего формирования электромагнитного воздействия.

Литье стали в двухвалковом кристаллизаторе представляет собой перспективный способ получения полос металла, преимущество которого заключается в энергоэффективности, возможностях получения тонкого проката и контролирования качества обеих поверхностей полосы [5]. Суть технологии валковой разливки-прокатки состоит в том, что жидкий металл подается в зону, ограниченную двумя вращающимися валками, где путем кристаллизации формируются полосы металла. Ширина полосы определяется зазором межвалкового пространства. В межвалковом зазоре происходит сложное, в том числе замкнутое течение расплава, что влияет на процессы затвердевания полосы, структуру и качество металла.

Валковые кристаллизаторы отличаются многообразием вариантов проектирования и способов подачи расплава в ванну кристаллизатора, как например, в работе [5]. В связи с этим целью проводимых в мире исследований в направлении усовершенствования валковой технологии [3, 5–8] являются достижение стабилизации процесса разливки, высокого качества поверхности полосы, улучшение и уплотнение структуры металла. Такие исследования реализуются путем экспериментального и компьютерного моделирования гидродинамических и связанных с ними процессов в кристаллизаторе, а также путем оптимизации подвода металла в ванну кристаллизатора, включая выбор способа и скорости подачи расплава.

В последние годы в мире и в Украине проявляется тенденция создания металлургических лабораторных, опытных установок и мини-заводов по производству стали и проката [3, 5].

Это обуславливает необходимость проведения предварительных расчетно-теоретических исследований для понимания закономерностей движения потоков жидкого металла в кристаллизаторах заданной конструкции и для выбора приемлемого способа подачи расплава в межвалковый канал.

Цель данной работы – создание трехмерной модели и изучение на ее основе гидродинамических процессов в двухвалковом кристаллизаторе при различных способах подвода расплавленного металла в межвалковый зазор. Рассмотрены варианты двух способов подвода расплава – вертикальная подача через щель и через насадку. Компьютерное моделирование проведено с использованием метода конечных элементов в профессиональной программе *Comsol* [4].

Математическая модель и ее численная реализация. В разработанной модели для расчета гидродинамических процессов в системах двухвалковой разливки расплавленной стали четырех вариантов, показанных на рис. 1, приняты следующие положения и допущения:

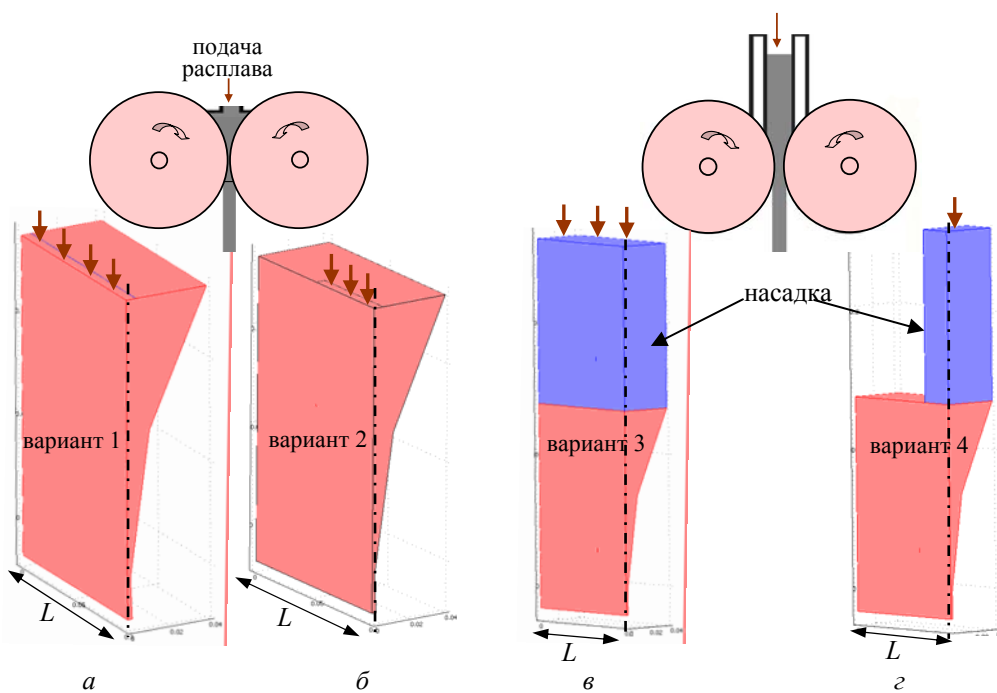


Рис. 1

- вращающиеся навстречу друг другу валки недеформируемые;
- расплав является ньютоновской (вязкой, несжимаемой) жидкостью;
- течение расплава ламинарное, когда скорость разливки достаточно низкая;
- гидродинамические задачи решаются в трехмерной постановке в декартовой системе координат не-

посредственно в области жидкого металла;

- вследствие симметрии относительно центральной вертикальной плоскости между валками и относительно центральной вертикальной плоскости по длине валков рассматривается 1/4 часть объема металла (рис. 1);
- процессы рассчитываются в установившемся режиме без учета малого по продолжительности начального переходного режима, а также без учета температуры нагрева расплава;
- физические свойства металла (плотность, вязкость) постоянны, не зависят от температуры.

Процессы течения расплава описываются системой уравнений Навье-Стокса:

| Характеристики | Значения |
|--|---------------------|
| Радиус валка, R , мм | 250 |
| Длина валка (ширина полосы), мм | 200 |
| Угол / высота мениска, θ / l , мм | 30 / 135 |
| Толщина полосы металла, мм | 3 |
| Скорость разливки (валка), v_n , м/с | 0,085 |
| Ширина щели для подачи расплава Δ , мм | 10 |
| Плотность расплава, ρ , кг/м ³ | 7000 |
| Динамическая вязкость расплава, η , Па/с | $6,2 \cdot 10^{-3}$ |
| Высота насадки, $R/2$, мм | 125 |
| Относительная погрешность решения задач | 10^{-6} |

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + \eta(\nabla\mathbf{u} + (\nabla \cdot \mathbf{u})^T) - (2\eta/3)(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I}]; \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho\mathbf{u}) = 0. \quad (2)$$

В системе неизвестными величинами являются \mathbf{u} – вектор скорости металла и p – давление. Приняты также обозначения: η – динамическая вязкость; ρ – плотность расплава; \mathbf{I} – единичный тензор.

Уравнения (1), (2) дополняются следующими граничными условиями. Условие симметрии задается на поверхностях симметрии; на входе – скорость истечения металла из щели или подачи металла через насадку v_0 ; на выходе – скорость жидкого металла по условию равенства расхода; на границе с валком – скорость его вращения v_n ; на граничной концевой поверхности по ширине полосы – условие открытой границы.

Результаты численных расчетов. Рассчитывались четыре варианта подвода металла в кристаллизатор согласно рис. 1, а именно: вариант подачи расплава через щель по всей длине валков (вариант 1); через щель на 1/2 длины валков (вариант 2); через насадку по всей длине валков (вариант 3); через насадку, занимающую 1/4 длины валков (вариант 4). Для вариантов 3 и 4 насадка имеет высоту $h = R/2 = 125$ мм, R – радиус валка.

Результаты компьютерных расчетов для таких вариантов при исходных данных, представленных в таблице, показаны на рис. 2–5.

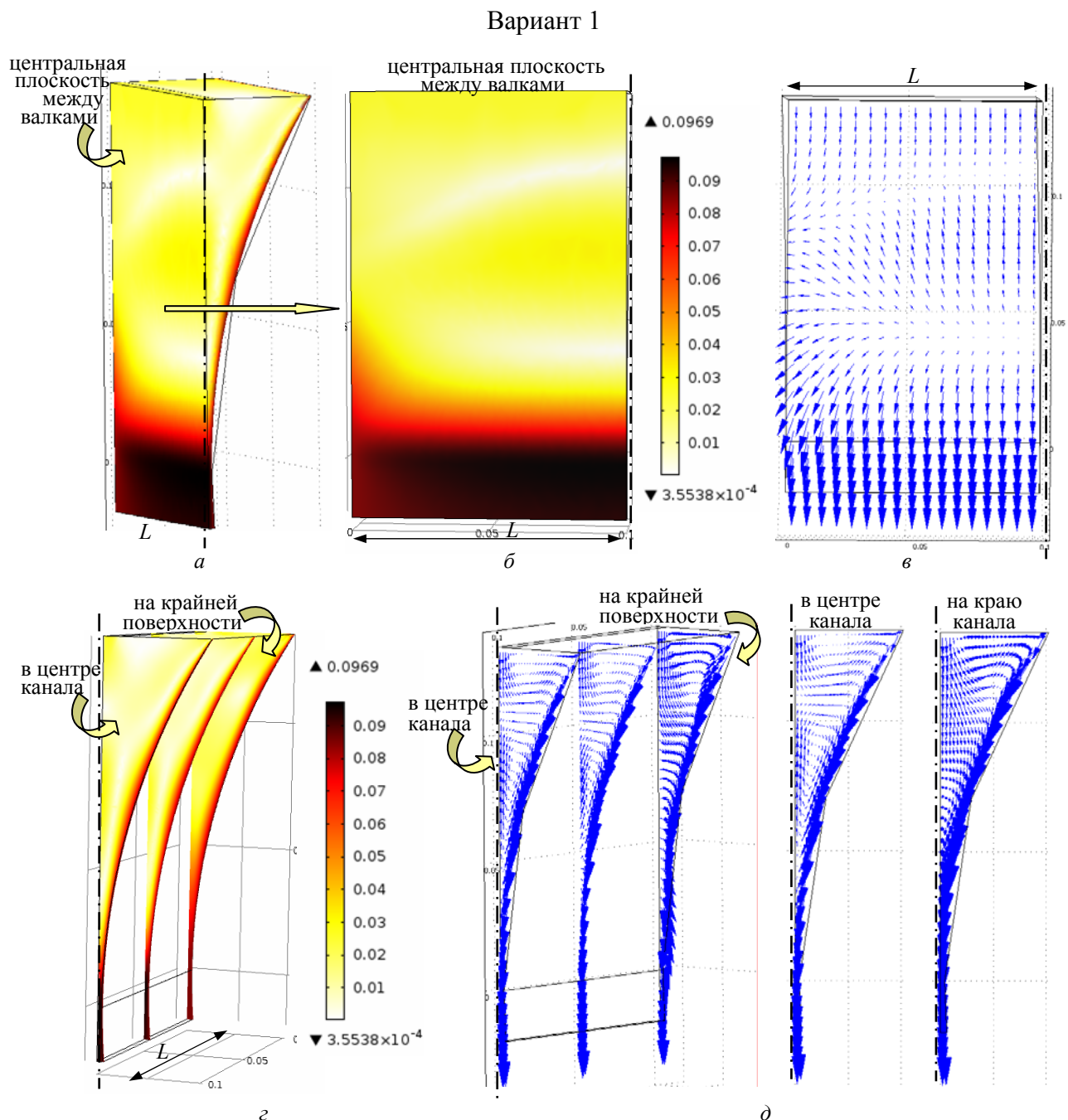


Рис. 2

На рис. 2 для варианта 1 системы с щелевым питателем при расположении щели по всей длине валков даны распределения поля скоростей: *a* – в оттенках серого цвета на поверхностях расчетной области; *б* – в центральной вертикальной плоскости между валками; *г* – в трех сечениях канала. На рис. 2 *д* показано распределение вектора скорости стрелками в выбранных характерных сечениях межвалкового зазора: в центре канала, т.е. в центральном сечении по длине валков, в срединном сечении расчетной области и на краю канала, т.е. на открытой концевой поверхности вдоль длины валков. На рис. 2 *в* дано распределение вектора скорости в центральной вертикальной плоскости между валками.

Аналогичные картины распределения поля скоростей представлены на рис. 3–5 для описанных вариантов 2–4.

Из расчетных данных следует, что поступающий в межвалковый зазор металл "притягивается" к границе с валком, наибольшие значения скорости имеют место в

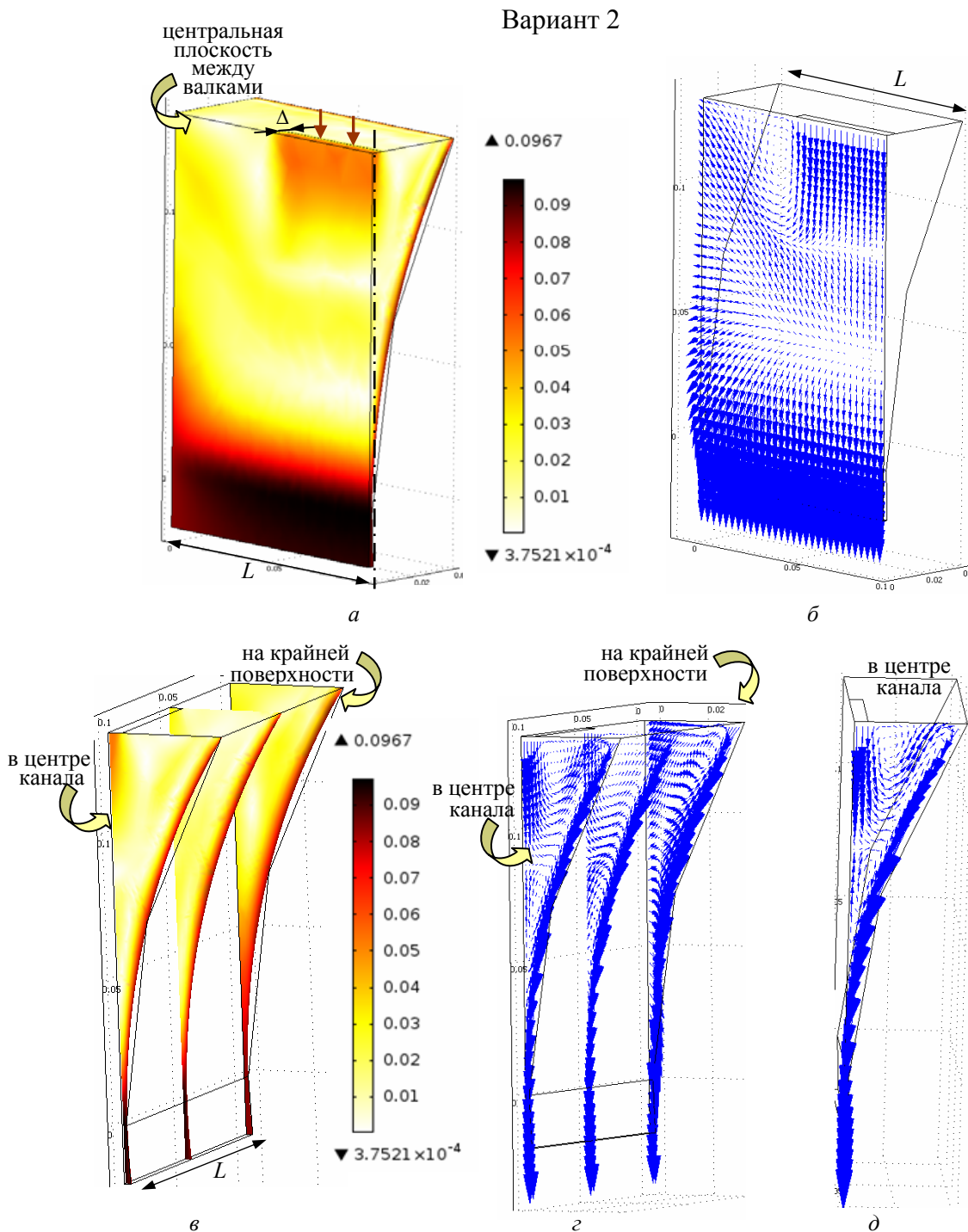


Рис. 3

прилегающей к валку области. Вихревые (замкнутые) течения расплава характерны для центральной зоны канала вариантов 1–3. В узком объеме насадки варианта 4 скорость подаваемого металла имеет одну ненулевую продольную составляющую и в самом канале циркуляция жидкого металла не происходит (рис. 5 в, д).

Распределения вектора скорости в центральной вертикальной плоскости между валками свидетельствуют, что при уменьшении длины щелевого питателя за его границей образуется вихревая структура течения расплава с небольшими по значению скоростями (рис. 3 б). При насадке по всей длине валков в центральной вертикальной плоскости также возникает развитое вихревое течение (рис. 4 в).

Потоки расплава в трех поперечных сечениях канала отличаются друг от друга для всех четырех вариантов кристаллизатора. На краях канала для случая щелевого питателя по всей длине валков в отличие от центральных сечений циркуляция жидкого металла не

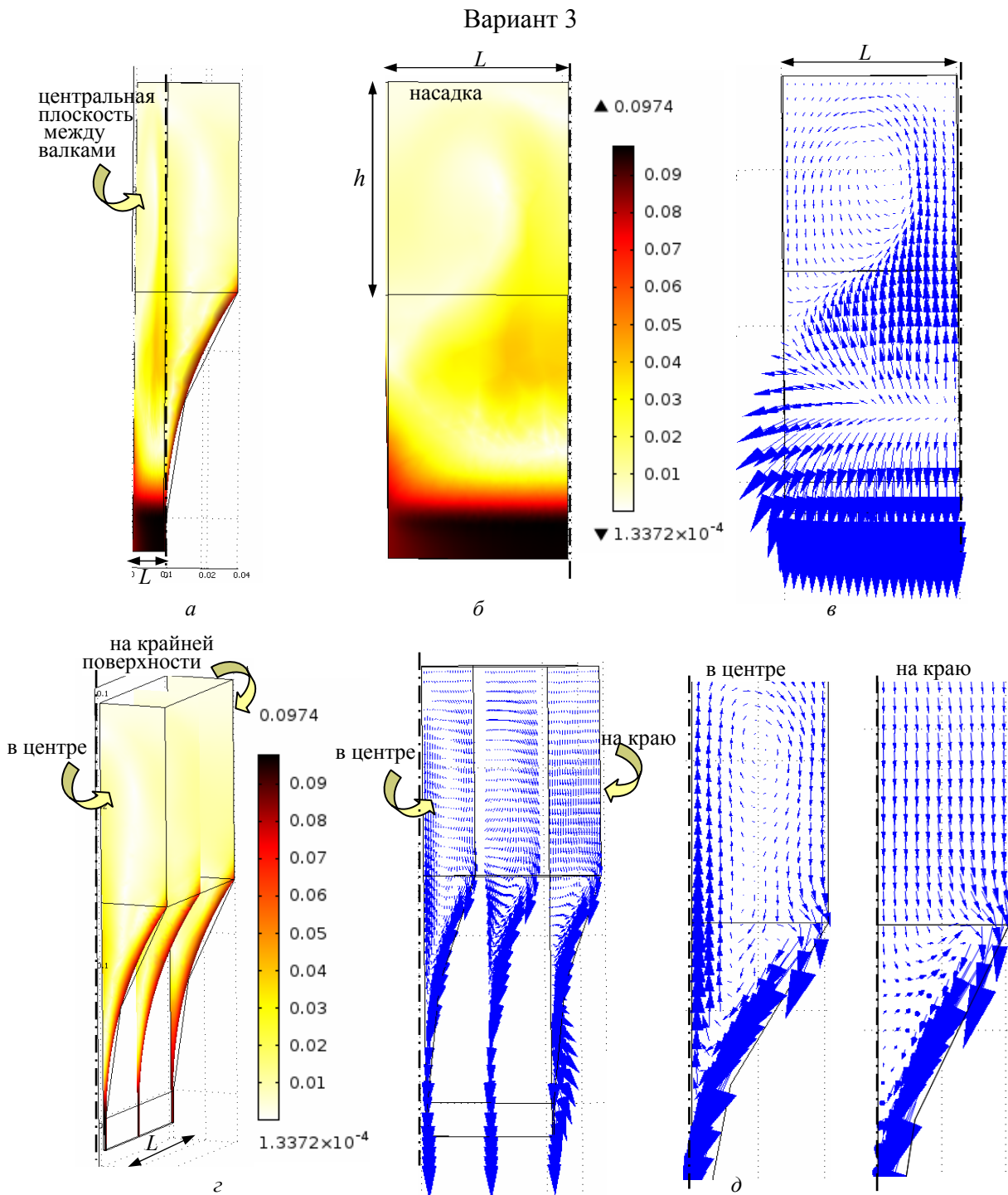


Рис. 4

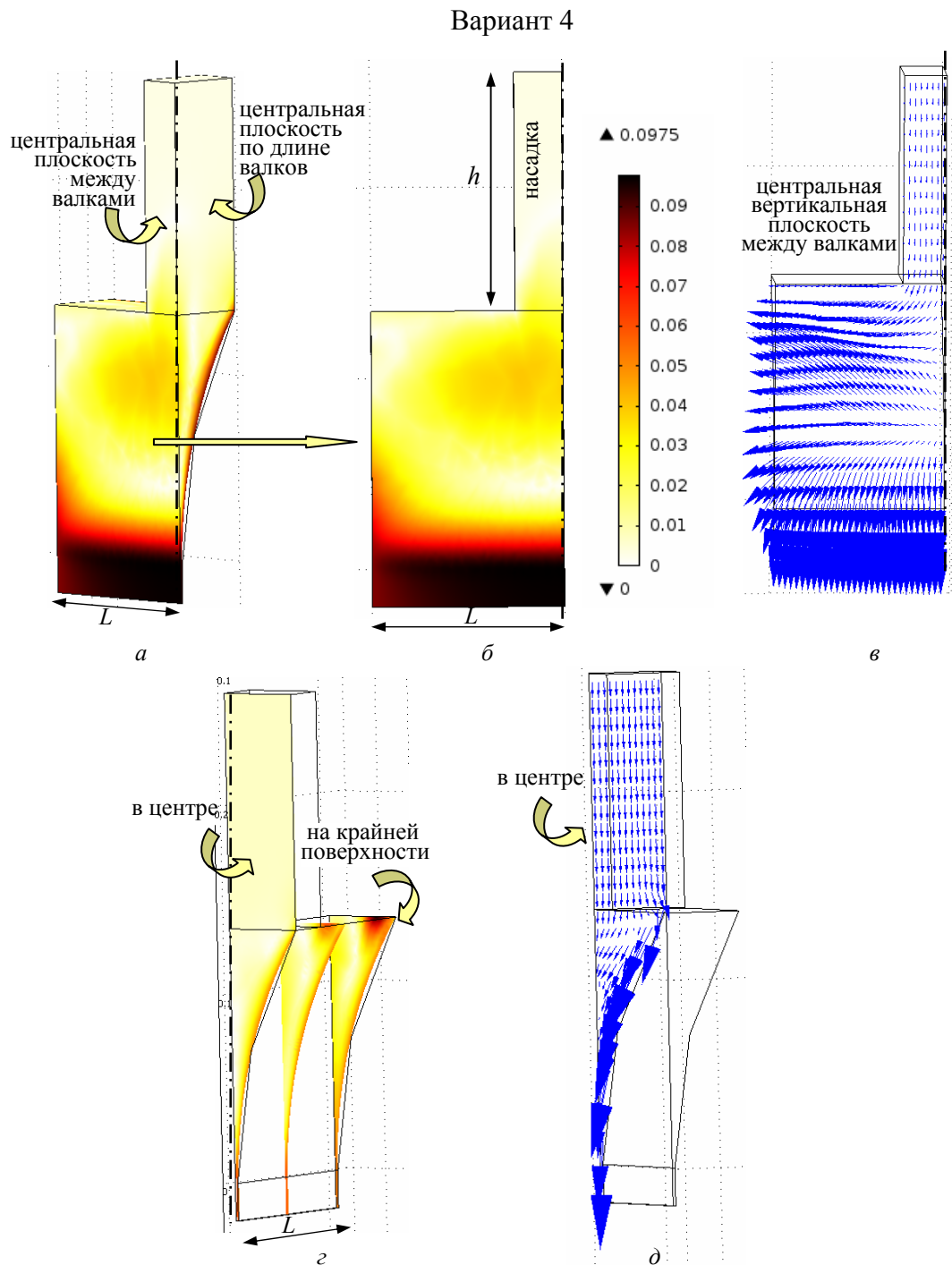


Рис. 5

происходит (рис. 2 д). При подаче металла через достаточно высокую насадку (высотой $R/2$) в центральной области по длине валков в самой насадке наблюдаются вихревые течения, тогда как на крайней поверхности они отсутствуют. При этом центр вихревой структуры находится в зоне насадки для варианта 3 (рис. 4 д).

На рис. 6 представлены распределения давления в различных сечениях канала для систем: а – варианта 1; б – варианта 2; в – варианта 3; г – варианта 4. Видно, что для рассмотренных вариантов давление в канале мало отличается по величине и характеру распределения. Наибольшие значения давления сосредоточены в нижней части межвалкового зазора в центральной его области. Давление в каналах оказывается несколько больше при подаче расплава через меньший по длине щелевой питатель и более узкую насадку (для сравнения на рис. 6: вариант 1 и вариант 2, вариант 3 и вариант 4).

Отметим, что полученные в работе картины течения расплава в межвалковом пространстве аналогичны трехмерным картинам гидродинамики, представленным в [3, 7], и со-

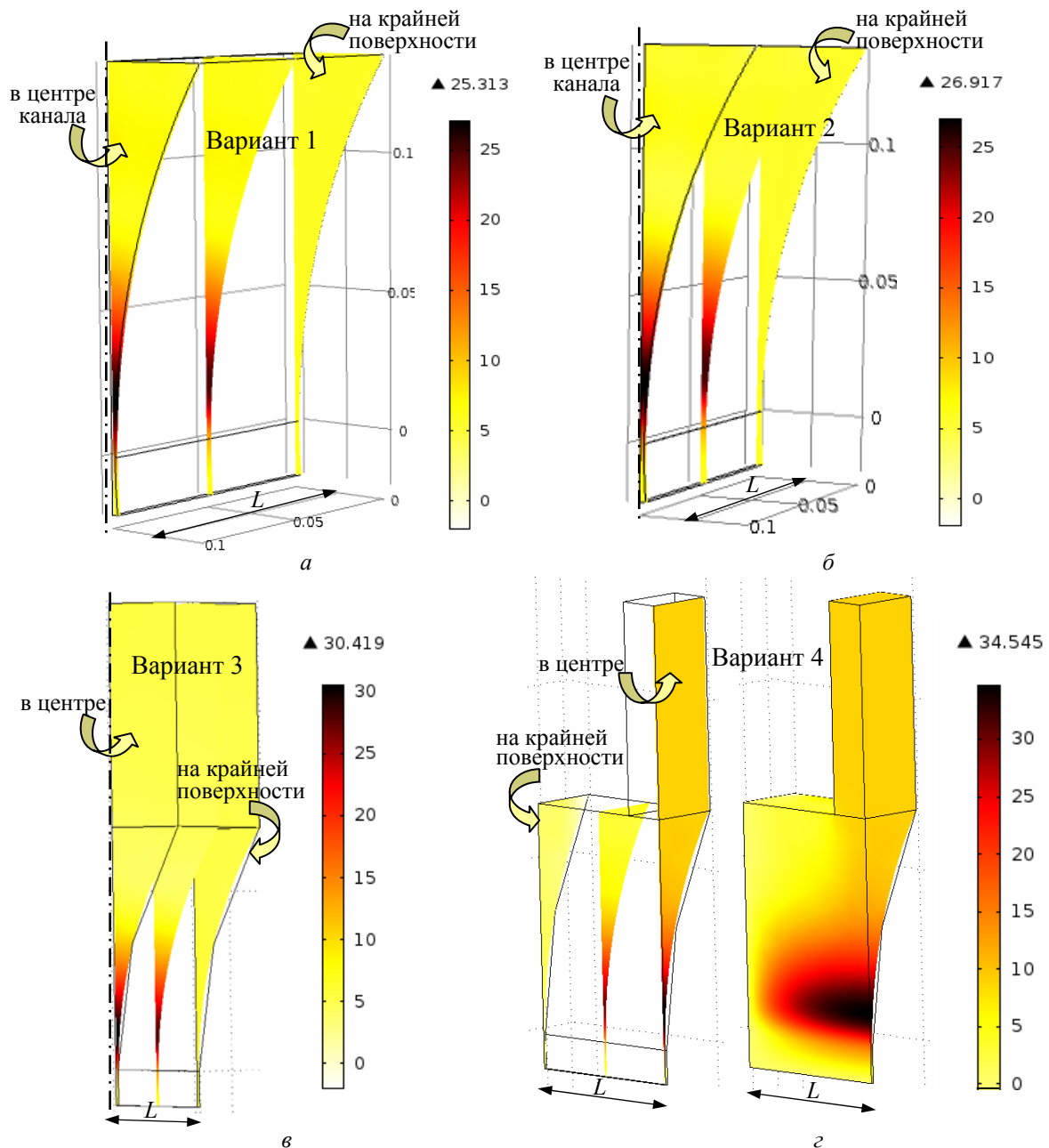


Рис. 6

гласуются с двумерными распределениями скорости, приведенными в работах [6, 8]. Закономерности в распределении поля скорости и давления, показанные на рис. 2–5 а, б и рис. 6, а именно увеличение значений этих величин по глубине межвалковой области и направлению течения расплава, подтверждаются теоретическими представлениями о характеристиках течения жидкости в суживающихся каналах.

Заключение. Разработана трехмерная компьютерная методика по расчету ламинарного течения жидкого металла в процессе валковой разливки-прокатки для двух способов подвода расплава в межвалковый канал – через щелевой питатель и насадку. Методика обладает широкими возможностями по заданию исходных данных процесса, включая возможность моделирования различных способов подачи расплава в межвалковый зазор, и в отличие от двумерных методик позволяет исследовать особенности течения металла в концевых зонах валков (краевые эффекты).

В результате проведения компьютерного моделирования показано, что ламинарное течение расплава в объеме межвалкового канала имеет сложный неоднородный характер и зависит не только от способа подачи расплава в канал, но и от размеров питателя. Для выбранных исходных данных в центральных областях межвалкового пространства при приме-

нення щелевого питателя і насадки по всій довжині валків відбувається циркуляція рідини з утворенням замкнутих вихрових структур. У поверхні валків по всій їх довжині швидкість руху розплаву максимальна. Давлення металу в зонах вихрового течія і на краях каналу низьке.

Отримані в роботі розподіли швидкості рідинного металу в зоні кристалізації є базовою інформацією для подальшого вивчення теплових і структурно-механічних станів оброблюваного матеріалу, а також для проектування електромагнітної системи утримання рідинного металу на торцях валків.

1. Залозний В.И. Анализ электромагнитных процессов при формировании свободных границ жидких металлов: – Дис. ... канд. техн. наук. – Киев, 1993. – 191 с.
2. Залозний В.И., Колесниченко А.Ф., Ющенко Б.А. Оценка эффективности электромагнитного уплотнения торцов валкового кристаллизатора для непрерывной разливки стального листа // Техн. електродинаміка. – 1988. – № 5. – С. 15–17.
3. Смирнов Е.Н., Кравченко А.В., Митьев А.П., Подобный С.О., Кравченко Е.Н. Разработка малой лабораторной установки для исследования процесса валковой разливки-прокатки // Обработка материалов давлением. – 2012. – № 3(32). – С. 230–234.
4. COMSOL multiphysics modeling and simulation software – <http://www.comsol.com/>
5. Ge S., Isac M., Guthrie I.L. Progress of strip casting technology for steel; historical developments. Review // ISIJ International. – 2012. – Vol. 52, No. 12. – P. 2109–2122.
6. Tomas B.G., Zhang L. Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. Review // ISIJ International. – 2001. – Vol. 41, No. 10. – P. 1181–1193.
7. Wang B., Zhang J.Y., Fan J.F., Zhao S.L., Ren S.B., Chou K.C. Modelling of melt flow and solidification in the twin-roll strip casting process // Steel Research International. – 2009. – Vol. 80, Is. 3. – P. 218–222.
8. Zhang Y. Modelling of vertical twin-roll casting of magnesium alloys. – Master of Engineering thesis // University of Wollongong, Faculty of Engineering. – 2012. – 131 p. – <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=4536&context=theses>

УДК 621.74.047:004.94

О.В. Ноговицин, докт. техн. наук, **О.Д. Подольцев**, докт. техн. наук, **І.М. Кучерява**, докт. техн. наук

1 – Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,

бул. Академіка Вернадського, 34/1, Київ, 03680, Україна

2, 3 – Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Тривимірне моделювання гідродинамічних процесів у двовалковому кристалізаторі при різних способах подачі металу

Розроблено тривимірну математичну модель та комп'ютерну методику з розрахунку течії розплавленого металу в міжвалковому каналі двовалкового кристалізатора при вертикальній подачі металу через щілину та насадку різних варіантів. З використанням методу кінцевих елементів у програмі Comsol проведено комплексні комп'ютерні розрахунки. За результатами комп'ютерного моделювання вивчено особливості руху металу в об'ємі кристалізатора, серед яких роль крайових ефектів, замкнуті вихрові структури течії розплаву в центральних областях міжвалкового зазору та у широкій насадці. Бібл. 8, рис. 6, таблиця.

Ключові слова: валкова розливка-прокатка, тривимірне комп'ютерне моделювання, ламінарна течія, поле швидкості, тиск, циркуляція розплаву.

O.V. Nogovitsin, O.D. Podoltsev, I.M. Kucheryava

1 – Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine,

boulevard Vernadskogo, 34/1, Kiev, 03680, Ukraine

2, 3 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Three-dimensional modeling of hydrodynamic processes in twin-roll caster at various melt feeders

The three-dimensional mathematical model and computer technique are developed for computations of molten metal flowing in the gap of twin-roll caster at vertical melt feeding through the slit nozzle and pass nozzle of different variants. The computer modeling is carried out by finite-element method in Comsol. The features of metal flow in the caster including edge effects, closed vortex structures of the flow in central zone of the gap between rolls and in wide pass nozzle are studied using the computational results. References 8, figures 6, table.

Key words: roll metal casting, computer 3D modeling, laminar flow, velocity field, pressure, melt circulation.

Надійшла 23.10.2014

Received 23.10.2014