

Дмитриев Э. А., Карпенко В. А., Одинок В. И., Евстигнеев А. И.
E. A. Dmitriev, V. A. Karpenko, V. I. Odinokov, A. I. Evstigneev

**ЭВОЛЮЦИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МАТЕМАТИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПОДАЧИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА
В КРИСТАЛЛИЗАТОР И ЕГО ПЕРЕМЕШИВАНИЕ**

**EVOLUTION OF DOMESTIC STUDIES OF MATHEMATICAL MODELING
OF THE PROCESSES OF LIQUID METAL FEEDING INTO THE CRYSTALLIZER
AND ITS STIRRING**

Дмитриев Эдуард Анатольевич – доктор технических наук, профессор, ректор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

Eduard A. Dmitriev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Rector, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

Карпенко Владимир Анатольевич – соискатель Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Vladimir A. Karpenko – Degree Candidate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: volodya.karpenko.89@mail.ru.

Одинок Валерий Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Valeriy I. Odinokov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: 79122718858@yandex.ru.

Евстигнеев Алексей Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: diss@knastu.ru.

Aleksey I. Evstigneev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: diss@knastu.ru.

Аннотация. В статье подведены некоторые итоги и обобщены результаты многолетних исследований математического моделирования процессов течения жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при различных конструкциях устройств подачи и перемешивания расплава. Результатом исследований стали поля температур и скоростей течения расплава в различных сечениях кристаллизатора. Установлены особенности и характер движения потоков расплава металла в объеме кристаллизатора.

Summary. The article summarizes some results of long-term studies of mathematical modeling of the liquid metal flow in the UNRS crystallizer with various designs of melt feeding and mixing devices. The results of the research were the fields of temperatures and flow rates of the melt in various sections of the crystallizer. The features and nature of the movement of metal melt flows in the crystallizer volume are established.

Ключевые слова: установка непрерывной разливки стали, кристаллизатор, глуходонный стакан, расплав, перемешивание, поля температур и скоростей.

Key words: installation of continuous casting of steel, crystallizer, gluhodon glass, melt, mixing, temperature and velocity fields.

УДК 621.74.043

Процесс разливки металла в установке непрерывной разливки стали (УНРС) заключается в подаче из промежуточного ковша жидкого металла через погружной керамический стакан и выходные отверстия (окна) в нём в водоохлаждаемый кристаллизатор прямоугольного сечения, а

также в его дальнейшем течении в объёме кристаллизатора. Течение потоков металла в кристаллизаторе оказывает влияние на температурное поле внутри кристаллизующейся заготовки, а значит, на макро- и микроструктуру конечного продукта. Вместе с этим кинематика потока расплава оказывает влияние на перемешивание жидкой фазы металла в кристаллизаторе УНРС.

Поэтому повышение качества готовой продукции за счёт технологичности процессов и совершенствования комплекса оборудования с целью увеличения его надёжности, устойчивости и производительности является и будет являться на ближайшую перспективу основополагающим направлением теоретических, экспериментальных исследований и производственных испытаний.

В задачах, где требуется исследование течения металла внутри кристаллизатора УНРС, поведение расплава необходимо описывать уравнениями Навье – Стокса и уравнением теплопроводности с учётом переноса тепла, что говорит о сложности решения подобных задач. Пока основным инструментом её исследования и оптимизации параметров разлива является эксперимент. Математическое моделирование применяется нечасто, в основном для решения задач, связанных с формированием затвердевающей корочки металла.

Во всех работах авторов настоящей статьи при определённых допущениях строится математическая модель, описывающая гидродинамические процессы в УНРС при моделировании новых разработанных способов подачи жидкого металла в кристаллизатор и его перемешивания в нём с целью обоснования их эффективности.

Математическая модель основывается на фундаментальных уравнениях сплошных сред, уравнениях математической физики, апробированном численном методе и специально разработанных программных комплексах.

Прикладное математическое моделирование процесса позволит значительно сократить продолжительность проверки и экспертизы того или иного технического решения и сэкономить существенные средства по экспериментальной проверке и отработке технического или технологического проекта.

Объединяющим началом всех публикаций авторов статьи по данному направлению исследований является то, что исследования проводятся по единой методологии построения математической модели и решения поставленных задач. Разница только в инженерной постановке задач (расчётные схемы), поставленных ограничениях в виде граничных условий. Такая методология построения математической модели использована при моделировании в различных областях для схожих технологических задач в процессах обработки металлов давлением [1; 2; 3] и напряжённо-деформированного состояния оболочковых форм в литье по выплавляемым моделям [4; 5; 6]. Конечным результатом всех работ является построение полей температур жидкого металла и скоростей течения его потоков при подаче и перемешивании в различных зонах объёма кристаллизатора, поля температур и эпюры напряжений в оболочковых формах, поля температур и эпюры напряжений, скорости металла в деформируемой заготовке.

Учитывая, что построение математической модели, описывающей гидродинамические процессы в кристаллизаторе, уже полностью отражено в опубликованных работах [7–14] с использованием программного комплекса [15], авторы сочли правомерным не приводить их в настоящей работе, а порекомендовать читателям ознакомиться с ними в первоисточниках, что позволяет значительно сократить объём настоящей работы.

Все вычислительные расчёты проводятся с использованием широко апробированного численного метода. Его особенность заключается в том, что базисными неизвестными считаются средние характеристики величин напряжений, скоростей (перемещений) на гранях элементов, образованных системой ортогональных поверхностей, а не значения этих величин в узлах сетки. Полученные уравнения записываются в единообразной форме, не зависящей от вида ортогональных систем координат. При этом упрощается запись граничных условий задачи.

В последних работах авторов настоящей статьи заложены предпосылки и методология концептуального подхода по математическому моделированию процессов подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе, на базе которых продолжают развиваться разработки и исследования по моделированию новых разрабатываемых процессов.

Методология построения математической модели имеет свою строгую последовательность. На первом этапе обозначаются схема исследуемого процесса и устройства для его осуществления с описанием технологий и особенностей конструкции устройства.

На таком этапе инженерной постановки задачи в целях упрощения решения задачи принимаются различные ограничения по геометрии погружных стаканов и допущения, на основе которых строится формализованная расчётная схема процесса. Накладываются ограничения, с учётом которых записывается система дифференциальных уравнений в декартовой системе координат.

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$) и стационарного течения ($\partial v / \partial \tau = 0$) имеем систему уравнений гидродинамики в виде закона количества движения и уравнения теплопроводности. Уравнения гидродинамики переписываются в систему уравнений течения ньютоновской вязкой несжимаемой жидкости. Это нужно, чтобы использовать апробированный численный метод.

Далее накладываются начальные и граничные условия решения задачи.

Решение сформулированной системы уравнений осуществляется разработанными численными методами в соответствии с численными схемами и алгоритмами.

Задаются требуемые геометрические параметры кристаллизатора.

Из равенства секундных объёмов определяется скорость выхода потока металла из погружного стакана.

Тепловые потоки по стенкам кристаллизатора определяются аппроксимацией экспериментальных данных, взятых из работ авторов [7–14].

Далее проводятся вычисления, результаты которых представляются в виде полей скоростей течения жидкого металла в различных плоскостях.

При осесимметричном расположении выходных окон в погружном стакане имеют место относительно спокойные течение и заполнение объёма кристаллизатора жидким металлом, и его перемешивание.

При эксцентричных окнах в глуходонном стакане отмечается уже более интенсивное перемешивание потоков жидкого металла в объёме кристаллизатора.

Дополнительным источником повышения интенсивности перемешивания жидкого металла в объёме кристаллизатора является свободное вращение самого глуходонного стакана различного конструктивного исполнения за счёт реактивных сил выхода металла.

На этом возможности свободного вращения погружного стакана по повышению интенсивности перемешивания исчерпываются.

Поэтому было решено с целью дальнейшего повышения интенсивности использовать принудительное вращение глуходонного стакана в разных вариантах.

Первоисходным основополагающим решением авторов по совершенствованию устройства подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС является работа [16], в которой предложена конструкция устройства, позволяющая совместить процессы подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе. Это решение послужило первоосновой будущих разработок по технологии процесса, а также оборудования для его осуществления.

Первые работы по исследованию в данном направлении проводились в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН (г. Комсомольск-на-Амуре) в середине нулевых годов, по результатам которых А. И. Горнаковым была защищена кандидатская диссертация по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» [17].

Затем в Комсомольском-на-Амуре государственном университете более 10 лет активно продолжались исследования как в теоретическом, так и конструкторско-технологическом плане [7; 8].

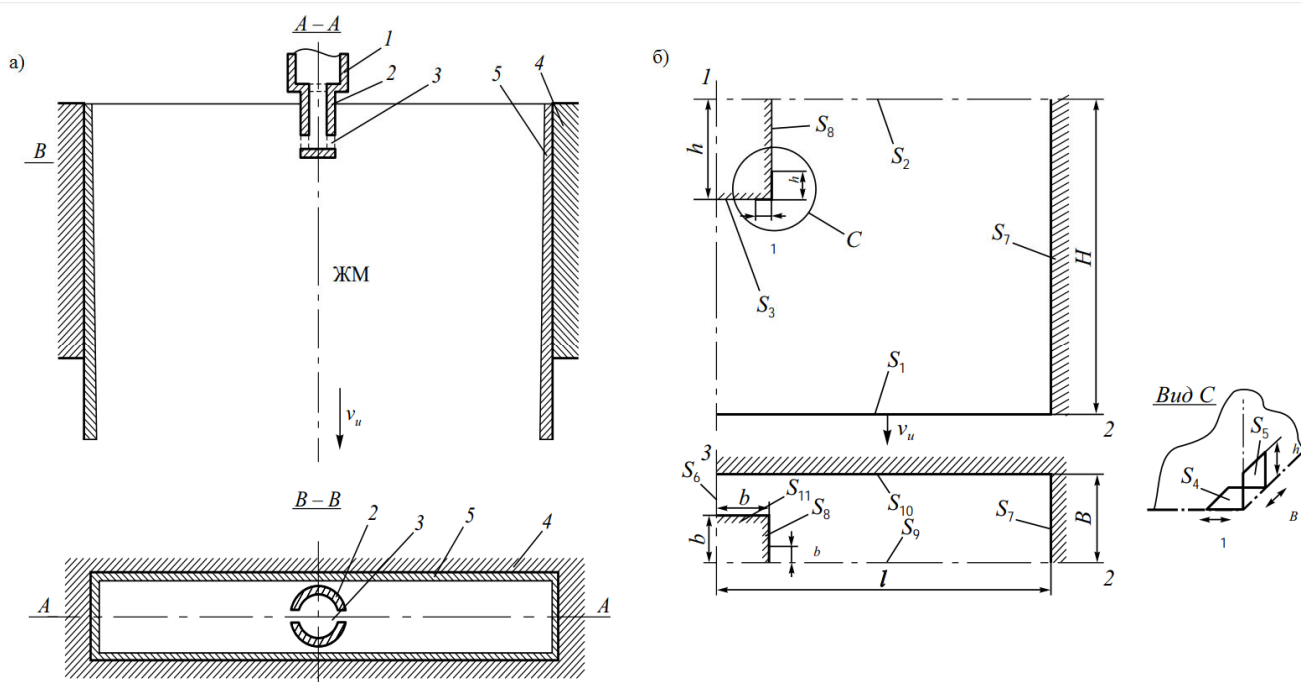
В теоретическом плане особое внимание сосредоточено на направлении исследований, связанном главным образом с прогнозным (предсказательным) имитационным математическим моделированием разрабатываемых процессов.

Анализ отечественной патентной и научно-технической литературы свидетельствует о том, что в настоящее время подобных исследований и разработок других исследователей в этом

направлении практически не отмечается, что подтверждает приоритетность исследований и разработок авторов.

Так, в первых опубликованных работах авторов [7; 8] были заложены основы численного моделирования подачи жидкого металла в кристаллизатор прямоугольного сечения из погружного стакана двумя симметричными струями и особенности его свободного течения в объёме кристаллизатора с использованием численного метода, предложенного в работе [18] и программного продукта [15], а в работе [14] – принудительного течения.

Для схемы установки (см. рис. 1, а) представлена формализованная и расчётная схемы исследуемого процесса (см. рис. 1, б), построены математическая модель, численная схема, алгоритм и программное обеспечение процесса. В результате вычислительных экспериментов по исследованию процесса построены поля температур (см. рис. 2, а) и скоростей потоков жидкого металла в кристаллизаторе (см. рис. 2, б, в).



1 – промежуточный ковш; 2 – погружной стакан; 3 – выходные отверстия погружного стакана; 4 – кристаллизатор; 5 – закристаллизовавшаяся корочка металла

Рис. 1. Схема исследуемой установки (а) и формализованная расчётная схема процесса (б)

В работе [9] и последующих с использованием вышеописанной методологии построения математической модели выполнены численные моделирования течения металла в кристаллизаторе при его истечении из погружного стакана уже с эксцентричными отверстиями вместо симметричных, а в работе [10] – при его подаче на отражатель по схеме [16].

Для вышеотмеченных работ характерно свободное истечение жидкого металла из погружного стакана в кристаллизатор и его течение в нём без использования эффекта вращения частей устройства. Приведены поля скоростей и температур металла в зоне кристаллизатора в горизонтальной и вертикальной плоскостях, а также зависимости длины вектора от скорости потока. Подтверждено предположение о более интенсивном перемешивании жидкой фазы при использовании стакана с эксцентрично расположенными выходными отверстиями.

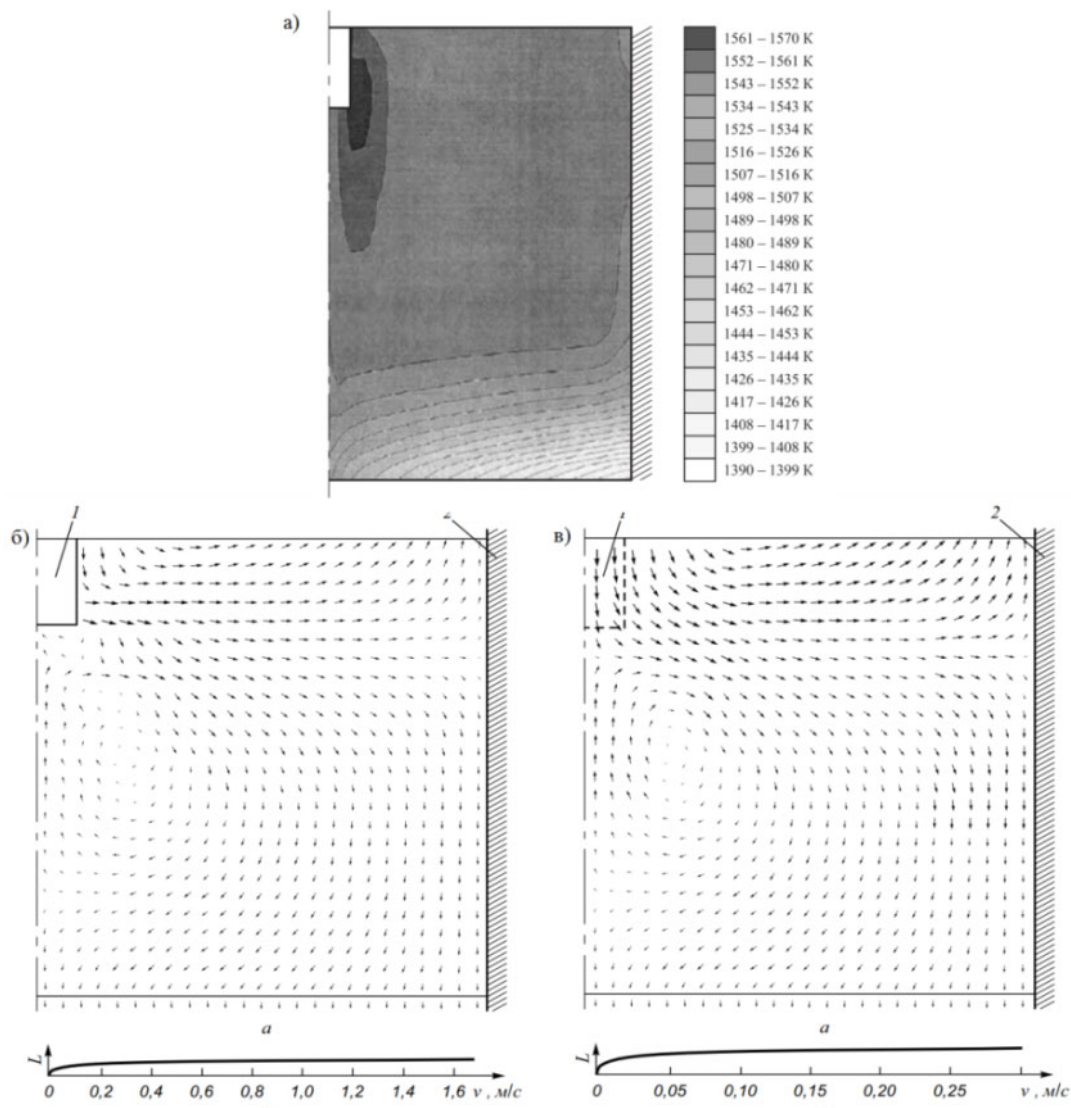


Рис. 2. Поле температур на границе S_9 (а), схема движения потоков металла на границе S_9 (б) и S_{10} (в) и зависимость длины вектора от скорости потока

В работах [11; 12] промоделирован процесс уже заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при свободно вращающемся погружном стакане и эксцентричных выходных окнах [19]. Приведённые в работах потоки жидкого металла в объёме кристаллизатора указывают на эффективность предположенного технологического процесса заполнения кристаллизатора за счёт реактивных сил истечения металла из выходных окон. Интенсивным перемешиванием охвачен весь объём жидкого металла в кристаллизаторе.

В работе [13] представлена математическая модель нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при принудительно вращающейся рубашке с вертикальными рёбрами и эксцентричными выходными окнами [20]. Показано, что при принудительном перемешивании жидкого металла в прямоугольном кристаллизаторе в продольном вертикальном сечении (см. рис. 3) и поперечном вертикальном сечении (см. рис. 4) отмечается интенсивное омывание стенок кристаллизатора, способствующее интенсивному отводу тепла от жидкого металла к стенкам кристаллизатора. В верхней части кристаллизатора наблюдается ускоренное движение потоков жидкого металла. На узких стенках кристаллизатора имеет место заброс жидкости металла (даже при $n = 30$ об/мин) в область шлаковой рубашки.

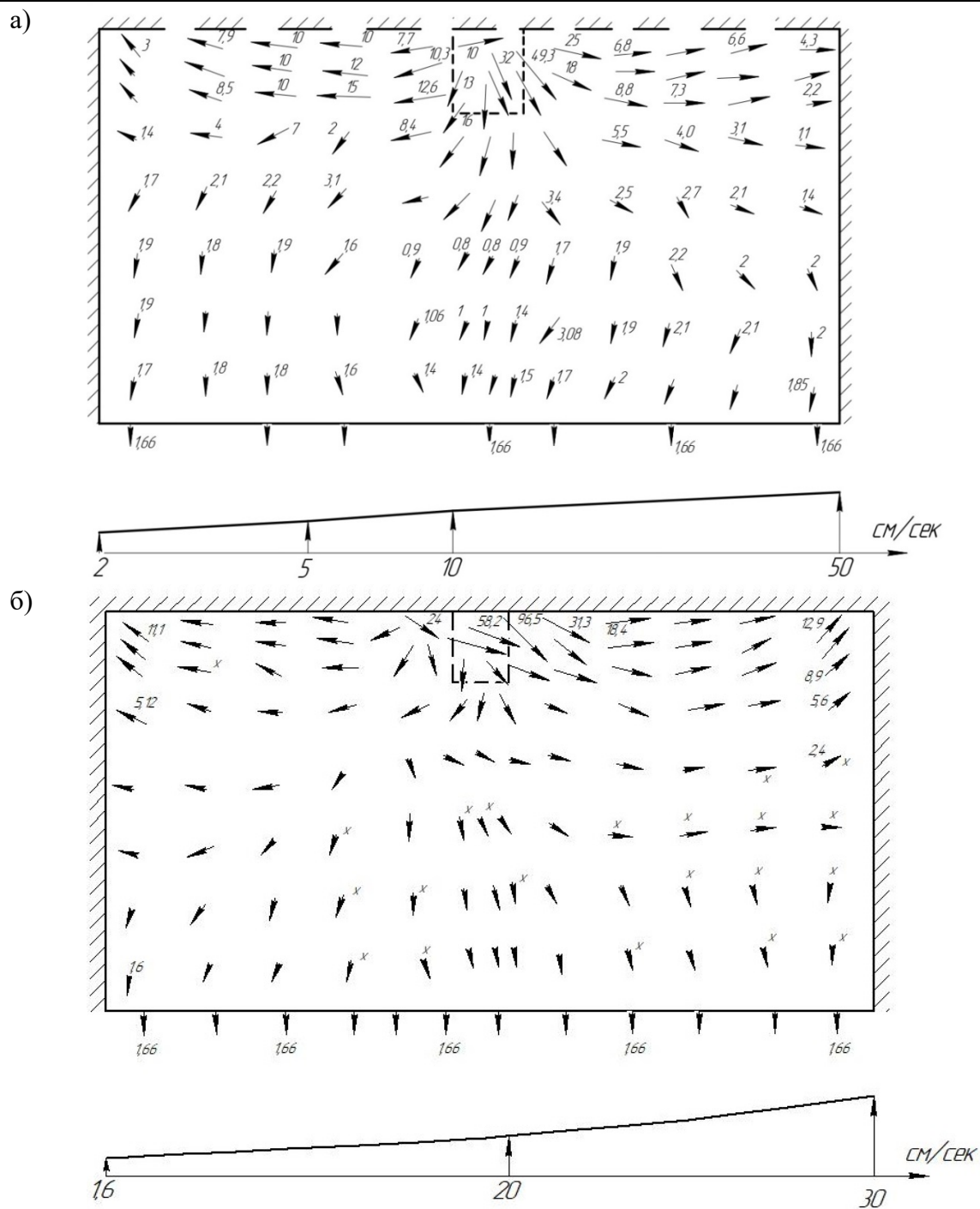


Рис. 3. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в продольном пристеночном вертикальном сечении: а – при $n = 30$ об/мин; б – при $n = 50$ об/мин

В работе [14] наиболее полно представлены результаты математического моделирования процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС при принудительном вращении рубашки с вертикальными рёбрами. Представлены вектора потоков жидкого металла в других различных сечениях кристаллизатора (в дополнение к сечениям [20]) при различных числах оборотов рубашки с вертикальными рёбрами. Выявлены области различной турбулентности. Оптимальный режим перемешивания происходит при $n = 30$ об/мин. При $n = 50$ об/мин и выше наблюдается выброс жидкого металла в шлаковую ванную.

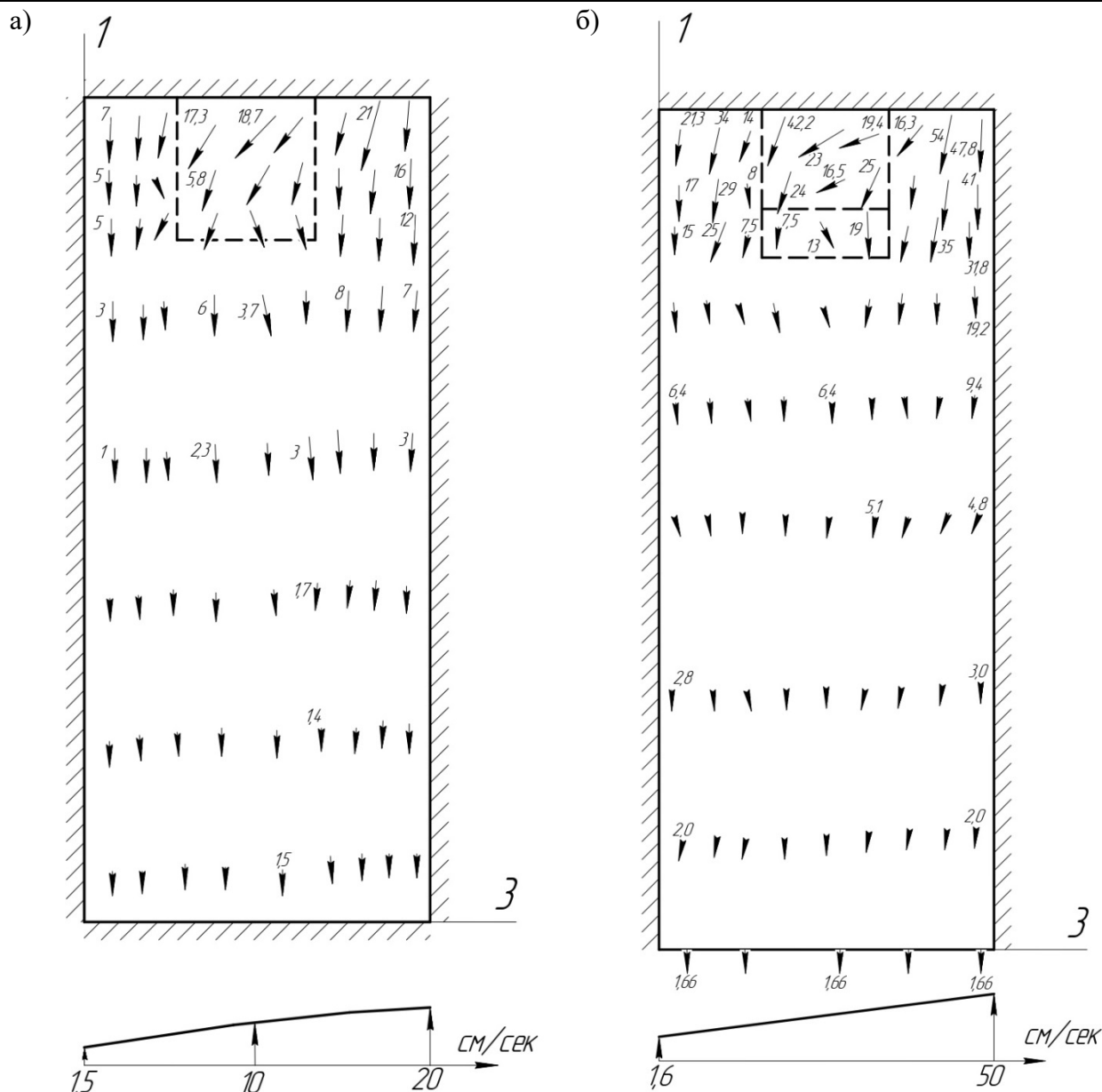


Рис. 4. Поле скоростей потоков течения металла в кристаллизаторе в поперечном центральном вертикальном сечении: а – при $n = 30$ об/мин; б – при $n = 50$ об/мин

Для устранения данного недостатка разработаны новые конструктивные решения устройств [21; 22].

А в работе [23] дан сравнительный анализ некоторых результатов математического моделирования свободного и принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС. Отмечены закономерности движения потоков жидкого металла в кристаллизаторе, характерные как для свободного, так и для принудительного перемешивания.

Так, для свободного перемешивания отмечается повышение интенсивности перемешивания при замене симметричных выходных окон на эксцентричные.

Интенсивность перемешивания значительно увеличивается при применении принудительного перемешивания и эксцентричных окон в глуходонном стакане. Пороговым значением числа оборотов при таком процессе является 50 об/мин, при превышении которого отмечается заброс жидкого металла в область шлаковой рубашки. Замена эксцентричных окон при таком процессе на симметричные убирает вероятность таких забросов.

В перспективе следует ожидать новые подходы к разработке технологий подачи жидкого металла в кристаллизаторы УНРС и машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и характеров его течения и перемешивания в его объёме на основе новых конструктивных решений устройств подачи и перемешивания жидкого металла, которые будут также математически промоделированы.

Выводы:

1. Разработанные математические модели процесса подачи и течения жидкого металла в кристаллизаторах УНРС и МНЛЗ, численный алгоритм и программы расчёта могут быть использованы при проектировании опытных (экспериментальных) процессов и устройств для имитационного их моделирования.

2. Используемые подходы и методы расчёта могут быть полезны также при исследовании схожих процессов в металлургии и литейном производстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Одинок, В. И. Моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле / В. И. Одинок, Н. С. Ловизин, С. Ю. Склад // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 9. – С. 129-145.
2. Моделирование поля температур при получении металлоизделий на литейно-ковочном модуле с односторонним воздействием бокового бойка и неподвижной плитой / Э. А. Дмитриев, Д. А. Потянихин, В. И. Одинок, А. И. Евстигнеев, А. Е. Квашнин // Математическое моделирование и численные методы. – 2022. – № 2. – С. 63-77.
3. Математическое моделирование процесса деформации металла на литейно-ковочном модуле с изменённым приводом боковых бойков / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, Д. А. Потянихин, А. Е. Квашнин // Математическое моделирование и численные методы. – 2021. – № 3. – С. 3-23.
4. Влияние внешнего теплового воздействия на напряжённое состояние оболочковых форм по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, Е. П. Иванкова, А. В. Свиридов // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33. – № 1. – С. 63-76.
5. Моделирование внешнего силового воздействия на стойкость оболочковой формы при заливке в неё стали / А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. И. Одинок, Д. В. Чернышова, А. А. Евстигнеева, Е. П. Иванкова // Математическое моделирование. – 2022. – Т. 34. – № 5. – С. 61-72.
6. Одинок, В. И. Эволюция напряжённого состояния керамической формы при нестационарном внешнем тепловом воздействии / В. И. Одинок, Г. М. Севастьянов, И. Г. Сапченко // Математическое моделирование. – 2010. – Т. 22. – № 11. – С. 97-108.
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. – Т. 60. – № 6. – С. 493-499.
8. Евстигнеев, А. И. Моделирование заполнения жидким металлом кристаллизатора установки непрерывной разливки стали и машины непрерывного литья заготовок / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев. – 2018 International Book Market Service Ltd., member of Omniscryptum Publishing Group. – 56 с.
9. 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. – Т. 61. – № 8. – С. 606-612.
10. Одинок, В. И. Численное моделирование процесса заполнения металлом кристаллизатора с отражателем УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2019. – Т. 62. – № 3. – С. 747-755.
11. Моделирование нового способа подачи и перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. Ю. Александров // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 3. – С. 237-243.
12. Математическое моделирование процесса заполнения жидким металлом кристаллизатора УНРС при свободно вращающемся погружном стакане / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев, С. Ю. Александров // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2021. – Т. 64. – № 4. – С. 302-310.
13. Одинок, В. И. Моделирование нового процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 2023. – Т. 66. – № 6. – С. 733-742.

14. Одинок, В. И. Математическое моделирование процесса перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Математическое моделирование и численные методы. – 2023. – № 3. – С. 18-41.
15. Математическое моделирование гидродинамики расплава в машине непрерывного литья заготовок. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012614547 / Одинок В. И., Горнаков А. И. – № 2022614547: заявлено 30.03.2012; опубликовано 22.05.2012.
16. Патент № 196254 Российская Федерация, МПК В22D 11/10(2006.01). Устройство для подачи жидкого металла в вертикальный кристаллизатор установки непрерывной разливки стали через погружной прямоточный стакан: № 2019128247: заявлено 12.03.2018: опубликовано 21.02.2020 / Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 15.
17. Горнаков, А. И. Моделирование процесса движения жидкого металла в кристаллизаторе установки непрерывного литья стали: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Горнаков Антон Игоревич. – Комсомольск-на-Амуре, 2013. – 16 с.
18. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В. И. Одинок, Б. Г. Каплунов, А. В. Песков [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
19. Патент № 2741611 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2020108729: заявлено 27.02.2020: опубликовано 27.01.2021 / Одинок В. И., Дмитриев Э. А., Евстигнеев А. И., Александров С. Ю.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 7 с.
20. Патент № 2764446 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2021114411: заявлено 20.05.2021: опубликовано 17.01.2022 / Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Александров С. Ю., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – 7 с.
21. Патент № 2814101 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2023112363: заявлено 11.05.2023: опубликовано 22.02.2024 / Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 6.
22. Моделирование принудительного процесса перемешивания металла в кристаллизаторе УНРС при симметричных окнах в глухонном стакане / В. И. Одинок, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. А. Карпенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2023. – № V (69). – С. 15-22.
23. Патент № 2813189 Российская Федерация, МПК В22D 11/114 (2006.01), В22D 41/62 (2006.01). Устройство для подачи и перемешивания стали в кристаллизаторе установки непрерывной разливки: № 2023112365: заявлено 11.02.2023: опубликовано 10.02.2024 / Одинок В. И., Евстигнеев А. И., Дмитриев Э. А., Карпенко В. А.; заявитель ФГБОУ ВО «КНАГУ». – Бюл. 4.
24. Одинок, В. И. Анализ результатов численного моделирования эффективности свободного и принудительного перемешивания жидкого металла в кристаллизаторе УНРС / В. И. Одинок, Э. А. Дмитриев, А. И. Евстигнеев // Metallurg. – 2024. – № 2. – С. 76-81.