

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕПЛОФИЗИКИ

на правах рукописи

БЕЛОУСОВ ВЯЧЕСЛАВ ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК 536.421.1+532.522.546:621.746

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛОФИЗИКА В КРУПНЫХ СТАЛЬНЫХ
СЛИТКАХ

05.14.06 - Техническая теплофизика

05.16.02 - Металлургия черных металлов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Научный консультант доктор
технических наук, профессор
Недопекин Ф.В.

Киев-1996

Диссертация является рукописью
Работа выполнена в Донецком государственном
университете

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
НЕДОПЕКИН Ф.В.

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор	Н.М.Беляев
доктор технических наук, профессор	Н.И.Никитенко
доктор технических наук, профессор	Ю.Н.Яковлев

Ведущая организация

Институт черной металлургии НАН Украины г.Днепропетровск

Защита состоится "12" марта 1996г. в 13³⁰ часов
на заседании специализированного ученого совета Д 50.04.02
Института технической теплофизики НАН Украины по адресу:
252057, г.Киев, ул. Желябова, 2а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеки ИТТФ НАН
Украины

Автореферат разослан "7" февраля 1996г.

ЛНБ им. В. Стефаника
АН Украины

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

Кривошей Ф.А.

ЛНБ України ім.В.Стефаніка



00740040 (F)

Общая характеристика работы

Актуальность работы: Разливка и затвердевание слитков и отливок характеризуются сложнейшими гидродинамическими и тепло-массообменными процессами, которые протекают одновременно и взаимосвязаны, определяя, в конечном итоге, качество получаемого изделия.

Для изучения этих процессов требуются существенные технические и материальные затраты. Широкий фронт математических моделей позволяет существенно упростить эту задачу. В настоящее время численное моделирование является наиболее приемлемым и надежным методом исследования. Несмотря на допущения и предположения, сопутствующие математической и физической постановке задачи, полученные результаты при численном моделировании не только совпадают с экспериментальными и аналитическими, но раскрывают неизвестные аспекты в вопросе разливки и затвердевания стали. Однако практически, все постановки формулируются без учета турбулентных процессов, что не всегда позволяет адекватно исследовать процессы тепло-массообмена. То небольшое количество задач, которые выполняются в турбулентной постановке, не имеют обоснования для выбора той или иной модели замыкания турбулентности. Не определены границы применения моделей ламинарного и турбулентного или бесконвективного тепло-массообмена для слитков и отливок различного тоннажа и геометрии.

Поэтому настоящая работа посвящена выбору модели замыкания турбулентности при моделировании гидродинамических и тепло-массообменных процессов в период формирования стального слитка; разработке математической модели и исследованию гидродинамических и турбулентных тепло-массообменных процессов в крупных стальных слитках в период их формирования в естественных и вынужденных условиях; определению границ применения турбулентных, ламинарных и бесконвективных моделей при расчете стальных слитков.

Предметом исследования является комплексное изучение гидродинамики, турбулентного теплообмена в расливе и тепловых процессов в изложнице, оценка влияния заливки, турбулентной вязкости и газозахвата на гидродинамику и теплообнос в

затвердевающим расплаве.

Цель работы:

- разработка и численная реализация математических моделей гидродинамики, теплопереноса и затвердевания в период разлива и затвердевания слитка в изложнице, позволяющих учесть влияние турбулентности газозахвата;
- оценка роли турбулентности в процессе разлива и затвердевания слитка;
- определение границ применения турбулентной, ламинарной или бесконвективной моделей гидродинамики и теплообмена в период разлива и формирования слитка;
- разработка и численная реализация математических моделей, позволяющих рассчитать гидродинамику и теплоперенос в расплаве с внутренним холодильником, в биметаллическом слитке и в центробежной биметаллической отливке.

Практическая ценность и внедрение результатов работы в промышленность. Разработанные математические модели, вычислительный алгоритм, пакеты прикладных программ и результаты вычислительных экспериментов нашли применение в практике, а также в учебном процессе при изложении спецкурсов.

Разработана математическая модель и вычислительный алгоритм процесса подавления бурого дыма при сливе чугуна из миксера в ковш. Полученная вихревая структура позволила определить место наиболее рационального подвода инертного газа с целью подавления вредных выбросов. Знание зоны всасывания газа в период слива позволило УкрИТЭк разработать установку для подавления бурого дыма.

Разработано программное, информационное и организационное обеспечение для программы расчета процессов гидродинамики и теплопереноса при модифицировании чугуна в ковше с применением порошковой стальной проволоки с запрессованными внутри модифицирующими добавками (ферросплавы, содержащие SiCa, ферросиликоберий, Mg, ферротитан, соду, карбамиды, Zr, Al, Ni и др.). Компьютерные модели вышеперечисленных процессов учитывают турбулентный перенос, а также факт развития тепловой конвекции.

Разработана математическая модель и вычислительный алгоритм исследования теплофизических процессов в джерах канала "Северский Донец-Донбасс", с целью определения времени замораживания воды в зависимости от скорости ее течения и температуры окружающей среды в стальных трубах при отсутствии дополнительной теплоизоляции. Экономический эффект от отказа дополнительной теплоизоляции равен 1 000 000 крб. в ценах февраля 1994г.

Разработано математическое обеспечение позволяющее оценить гидродинамику и теплоперенос при истечении металла из ковша и работоспособность теплоизолирующих смесей различного состава.

Применение алгоритма и программы освободило пользователя от разработки части программного обеспечения и, соответственно, от дополнительных затрат на эту разработку, интеллектуализирует труд технолога с целью уменьшения технологического брака. Экономический эффект от внедрения составил 50 миллионов карбованцев в ценах на июнь 1995г.

Личный вклад в научную разработку Диссертация является самостоятельной работой автора, основанной на опубликованных ранее результатах его исследований. На различных этапах этих исследований автор пользовался консультацией известных ученых (Повха И.Л., Недопекина Ф.В., Огурцова А.П.), технологов Гриценко А.Я., Примака И.Н. В соавторстве с ними был опубликован ряд научных работ. Содержание диссертации является дальнейшим развитием положений, изложенных в этих публикациях, в значительной мере содержит новые исследования и не ущемляет интересы консультантов

Научная новизна. Выбрана модель замыкания турбулентности адекватно отражающая процессы теплопереноса в период разлива и затвердевания стали в изложнице.

Разработана математическая модель и применен алгоритм расчета полей скорости, температуры, концентрации с учетом турбулентности в расплаве в период наполнения им изложницы. Проведены комплексные исследования тепловой и гидродинамической обстановки в системе расплав - изложница на коркообразование; уточнена оценка тепловых потерь расплава за период наполнения. Оценена роль влияния газозахвата на гидродинамичес-

кум и теплообменную обстановку в расплаве и на кинетику затвердевания.

Сформулирована математическая модель, обоснован и применен алгоритм расчета сопряженной задачи термоконцентрационной конвекции, теплопереноса и затвердевания с учетом турбулентной вязкости, в приближении двухфазной зоны. Выполнены численные исследования и изучено влияние турбулентности на распределение полей скорости и температуры, кинетику затвердевания.

Результаты, полученные при реализации алгоритмов расчета гидродинамических и теплофизических процессов в расплаве, позволяют определить гидродинамические и теплофизические режимы выполнения изложницы и затвердевания расплава в ней.

При расчете гидродинамических и теплообменных процессов в слитке с внутренним холодильником, показана эволюция гидродинамических процессов в системе холодильник-расплав во времени, в зависимости от тоннажа слитка и относительных размеров холодильника. Практическая ценность этой работы в рекомендациях, позволяющих снизить энергозатраты при дальнейшей обработке такого рода слитков.

Впервые разработана математическая модель для расчета процессов, протекающих в период формирования композитного слитка. Изучены процессы в период формирования твердой корочки.

Разработаны математическая модель, вычислительный алгоритм и пакет прикладных программ (ППП), позволяющие рассчитать гидродинамику и теплоперенос при формировании биметаллической отливки в горизонтально вращающемся кокиле.

Автор защищает:

1. Математическую модель и алгоритм расчета задачи комплексного исследования гидродинамики, теплопереноса с учетом турбулентности и газозахвата в период наполнения изложницы.
2. Результаты вычислительного эксперимента по исследованию полей скорости, температуры, турбулентной вязкости и газовой фазы в расплаве в период ее наполнения при различных технологических параметрах.
3. Математическую модель и алгоритм расчета сопряженной задачи гидродинамики, турбулентного теплопереноса и за-

твердения в условиях термоконцентрационной конвекции с учетом влияния заливки и газового зазора.

4. Результаты многовариантных расчетов полей скорости, температуры, концентрации, турбулентной вязкости, кинетики затвердения слитка в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности.

5. Рекомендации по выбору модели замыкания турбулентности и определению границ применения конвективной турбулентной, ламинарной и бесконвективной модели при формировании стальных слитков.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на 1 и 2 международных форумах по теплообмену в Минске, 9, 10 и 11 Всесоюзной конференции "Проблемы стального слитка", 1, 2, 3 и 4 Международных конференциях "Кристаллизация и компьютерные модели", Международной конференции в Прмале в 1991г., на 1-й Всесоюзной конференции в Волгограде "Совершенствование металлургической технологии в машиностроении", 1990. "Тепло- и массообмен и гидродинамика в турбулентных течениях" в г.Алуште в 1992г.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы на 25 страницах из 230 наименований, приложения на 20 страницах и содержит 197 страниц машинописного текста, 107 иллюстраций и 9 таблиц.

Содержание работы

Во введении . сформулирована цель работы, ее актуальность, новизна и практическая ценность. Кратко изложены основные результаты работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена литературному обзору, состоящего из анализа: экспериментальных и теоретических исследований турбулентности в период разливки и затвердения слитков; влияния газовой фазы вносимой струей при разливке, на формирование слитка; массообменных процессов в формирующемся слитке.

На основании анализа литературных данных делается вывод, что до настоящего времени отсутствуют надежные методы, позволяющие исследовать взаимосвязанные процессы тепло-

переноса и затвердевания в период наполнения изложницы и формирования стального слитка в ней. Имеющиеся промышленные, лабораторные и аналитические исследования носят односторонний характер, а исследования, основанные на численном моделировании, не учитывают влияния турбулентной вязкости на процессы, протекающие в расплаве.

Поэтому возникает необходимость разработки комплексной математической модели, позволяющей исследовать гидродинамику и турбулентный теплоперенос в период формирования слитка. Определить границы применимости турбулентной, ламинарной и бесконвективной моделей в формирующемся стальном слитке

На основании аналитического обзора сформулирована постановка задачи исследования.

Вторая глава посвящена формулировке обобщенной математической модели, позволяющей рассчитать гидродинамику, турбулентный теплоперенос, затвердевание, газозахват в стальных слитках получаемых в изложнице. Математические модели базируются на принципах макроконтинуальной механики многофазных сред и теории квазиравновесной двухфазной зоны В.Т. Борисова. Процесс формирования слитка с учетом всех вышеперечисленных факторов включает в себя:

уравнение Навье-Стокса

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla P + \nu\nabla_{\text{эф}}^2\vec{V} + \beta_g\vec{g} + \beta_T\vec{g}T + \beta_d\vec{g}C; \quad (1)$$

неразрывности: $\nabla\vec{V}=0;$ (2)

теплопереноса: $c_{\text{эф}}\rho\left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)T\right) = \nabla\lambda_{\text{эф}}\nabla T;$ (3)

массопереноса: $\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)C = \nabla D_{\text{эф}}\nabla C;$ (4)

переноса газовой фазы: $\frac{\partial \beta_g}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\beta_g = 0;$ (5)

турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial K}{\partial t} + (\nabla \vec{v})K = \nu \nabla^2 K + G - g \beta_T T - g \beta_d T - E; \quad (6)$$

скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + (\nabla \vec{v})E = \nu \nabla^2 E + C_1 \nu G - \frac{E}{K} \frac{\nu}{\sigma_T} g \beta_T T - \frac{E}{K}; \quad (7)$$

где \vec{v} - скорость расплава; t - текущее время; ρ - плотность расплава; P - давление; $\nu_{\text{эф}} = \nu + \nu_t$; ν_L - коэффициент кинематической вязкости; $\nu_t = C_\mu K / E$ - турбулентная вязкость; β_g - коэффициент газосодержания; β_T , β_c - коэффициенты теплового и концентрационного изменения плотности расплава; T - текущая температура; C - текущая концентрация; $c_{\text{эф}} = 1 - W / (c_{\text{ж}} T_0) \partial \xi / \partial T$ - эффективная теплоемкость; $c_{\text{ж}}$ - теплоемкость в жидкой фазе расплава; W - скрытая теплота кристаллизации; T_0 - начальная температура расплава; ξ - доля твердой фазы, которая определяется из правила неравновесного рычага:

$$\xi = 1 - \left[\frac{T_0 - T}{T_0 - T_1} \right]^{-1/(1-k_0)}; \quad (8)$$

T_1 - температура ликвидуса; k - коэффициент распределения при-

меси; $\lambda_{\text{эф}} = (1-\xi) \left[(1-\beta_T) \lambda_{\text{ж}} + \beta_T \lambda_{\text{в}} + \frac{\nu \rho c_{\text{ж}}}{\sigma_T} \right] + \xi \lambda_T$ - эффективный ко-

эффициент теплопроводности; $\lambda_{\text{в}}$ - молекулярный коэффициент теплопроводности воздуха; $\lambda_{\text{ж}}$ - молекулярный коэффициент теплопроводности в жидкой фазе; $\lambda_{\text{ж}}$ - молекулярный коэффициент теплопроводности в жидкой фазе; λ_T - теплопроводность в твердой

фазе; $D_{эф} = (1-\xi) \left(D_{ж} + \frac{\nu_t}{\sigma_d} \right) + \xi D_T$ - эффективный коэффициент диффузии, $D_{ж}, D_T$ - коэффициент диффузии в жидкой и твердой фазе; K - турбулентная кинетическая энергия; E - скорость ее диссипации; $C_1, C_\mu, \sigma_T, \sigma_d$ - коэффициенты турбулентности;

$$G = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_1}{\partial x} \right)^2 \right];$$

диссипативная функция, возникающая в потоке вязкой жидкости за счет необратимой работы сил внутреннего трения.

Система уравнений (I)-(8) дополняется краевыми условиями:

- для скорости - условие симметрии на оси области, прилипания и непроницаемости на остальных границах (в период наполнения формы на входном отверстии ставится условие поступления струи, а на верхнем уровне - условие подъема зеркала металла);
- для температуры - $\partial T / \partial x = 0$ на оси области, на границе расплава - стенка формы - условие четвертого рода (в период наполнения изложницы), на границе твердая корочка - изложница - условие третьего рода (в период образования газового зазора), на границе формы - окружающая среда и зеркало расплава - окружающая среда - граничное условие третьего рода;
- для концентрации - всех границах $\partial C / \partial n = 0$;
- для газовой фазы: в струе - $\beta_g = \beta_0$ количество газовой фазы, захваченное струей, на всех остальных границах $\beta_g = 0$;
- для $k = \epsilon = 0$ на всех границах области.

В третьей главе представлены методы реализации математических моделей. Система уравнений (I)-(8) реализуется в переменных вихрь - функция тока ($\omega - \psi$).

Задача реализуется на неравномерной сетке, позволяющей учесть сложную геометрию слитка и имеющей сгущения в областях значительных градиентов скорости, температуры и концентрации (в области струи, стенки и дна формы).

Для переменных ($\omega - \psi$) строится неявная монотонная конечно-разностная схема с привлечением методов интегроинтерполяции -

ного, возмущенного оператора, разности против потока и прогонки. Совокупность всех этих методов сводит нелинейные дифференциальные уравнения к цепочке алгебраических. Достигается второй порядок аппроксимации по пространству и первый по времени.

В основе численной реализации для разливки и формирования слитков лежат неявные методы переменных направлений, прогонки, возмущенного оператора, разности против потока. Численный расчет осуществлялся на неравномерной конечно-разностной сетке со сгущением в областях наибольших градиентов скорости, температуры и концентрации. Такая сетка автоматически генерировалась с помощью специально разработанной программы, учитывающей тоннаж и конфигурацию изложницы, а также теплофизические параметры расплава и материала изложницы.

Все перечисленные методы были обоснованы на предмет устойчивости и сходимости. Это обоснование для неявных схем выполнено на основании численных экспериментов, проведенных на модельных уравнениях при различных количествах узлов конечно-разностной сетки.

Проведена оценка применимости модели турбулентности. Для этого тестировалась система осредненных стационарных уравнений:

$$V_1 \frac{\partial \omega}{\partial x} + V_2 \frac{\partial \omega}{\partial y} = \nabla [Pr(1+\nu_t)\nabla \omega] + Pr Ra \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad (I0)$$

$$\omega = -\Delta \phi \quad (II)$$

$$V_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} + V_2 \frac{\partial \theta}{\partial y} = \nabla [(1+\nu_t/\sigma_T)\nabla \theta]; \quad (I2)$$

Рассмотрено несколько видов течения в замкнутом объеме.

1. Естественная конвекция. Уравнения дополняются граничными условиями: для скорости - условия прилипания на всех границах; для температуры - на правой стенке $\theta = \theta_{cp}$ (θ_{cp} - безразмерная температура окружающей среды), на всех других границах выполняется условие адиабатичности;

2. Вынужденная конвекция, замыкаемая граничными условиями на верхней границе:

$$\Phi|_{\Gamma} = V_m x; \quad \omega|_{\Gamma} = \frac{2}{y^2} (\Phi|_{\Gamma-1} - V_m x); \quad x = [0, R]; \quad (13)$$

где V_m - скорость поступления расплава в объем; R - радиус струи; Γ - верхняя граница полости.

3. Смешанная конвекция, для которой выполняются следующие условия: гидродинамическое - (13) и тепловое ($\theta|_{\Gamma} = \theta_0$, $x=[0, R]$) на верхней границе. Для всех перечисленных видов течения жидкой стали $Pr=0,216$, $Ra=10^{10}$.

Из рис.1 видно, что при замыкании турбулентности моделью Прандтля

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{\partial v_1}{\partial y} \right|, \quad (14)$$

где l - длина пути смешения, значение ν_t на оси равно 0. Гипотеза смешения предполагает нахождение параметров турбулентности в состоянии локального равновесия вследствие выполнения в каждой точке баланса генерации и диссипации турбулентной энергии вне зависимости от предьстории развития процесса. Т.е. в модели Прандтля пренебрегается турбулентным переносом импульса в направлении от стенок к оси области.

Для второго вида течения (рис.1,б, кривая I) возрастания турбулентной вязкости наблюдается вблизи струи, где имеет место наибольший градиент скорости. Распределение турбулентной вязкости для третьего вида течения представлено на рис. 1,в, кривая I. Возникновение промежуточного минимума на кривой ν_t , противоречит физике процесса порождения турбулентности. Дело в том, что в этой части области значения поля скоростей наиболее высокие, что должно приводить к наибольшей интенсивности турбулентности. Но т.к. эта часть области характеризуется наименьшим градиентом скорости, то в соответствии с моделью Прандтля использование соотношения (14) и приводит к противоречивому результату.

Дальнейшие исследования проводились на однопараметрической модели, основанной на решении уравнения кинетической энергии турбулентности $k=0.5\overline{v_1'v_1'}$. Используя уравнение переноса для k

$$-\frac{\partial}{\partial x}(V_1 k) + \frac{\partial}{\partial y}(V_2 k) = \text{Pr} \left[\nu \left(1 + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \nabla^2 k \right] + G - \epsilon, \quad (15)$$

турбулентность можно оценить как

$$\nu_t = C_k \overline{k}^{1/2}. \quad (16)$$

Понятно, что в соответствии со второй моделью устраняется недостаток модели пути смешения, связанный со стремлением значений ν_t стремиться к нулю, когда $\partial V_1 / \partial y = 0$. Однако указанный способ определения турбулентной вязкости справедлив только в развитом турбулентном потоке, т.е. вдали от демпфирующего влияния стенки. Поэтому на стенке внутренние граничные условия задаются из следующих соображений. Известно, что вблизи стенок конвекция и диффузия малы. Поэтому диссипация и генерация уравновешивают друг друга и задача кинетической теории турбулентности сводится при этих условиях к модели длины смешения. Поэтому в пристеночной области в качестве внутреннего граничного условия для k можно использовать:

$$k(x_0) = l^2 (\partial V_1 / \partial y)^2 / C_D^{2/3}. \quad (17)$$

Т.е. основу однопараметрической модели турбулентности составляет система уравнений (10)-(12), (15) и соотношение (16)-(17). Представленные на рис. 1, а, б, в результаты вычислительного эксперимента (ВЭ) по исследованию турбулентной вязкости (кривые 2) на основе второй модели свидетельствуют об устранении недостатка, характерного для модели Прандтля: отсутствуют точки, в которых $\nu_t \rightarrow 0$ при $\partial V_1 / \partial y = 0$.

Но недостатком этой модели является независимость длины пути смещения от предыстории течения. Применимость однопараметрической модели ограничивается, главным образом, относительно простыми областями. Для более сложных областей (изложница, литейная форма), трудно получить эмпирическое выражение для длины пути смещения. Поэтому предложена двухпараметрическая модель (k - ϵ). Параметр скорости диссипации турбулентной энергии ϵ связан с другими модельными параметрами соотношением:

$$\epsilon = C_{\mu} \bar{k}^{3/2} / l$$

и находится из уравнения переноса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(V_1 \epsilon) + \frac{\partial}{\partial z}(V_2 \epsilon) = \text{Pr} \left[\nabla \left(1 + \frac{v_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \nabla \epsilon \right] + C_1 \text{Pr} G - C_2 \frac{\epsilon^2}{k}; \quad (18)$$

где $C_{\mu}, C_1, C_2, \sigma_{\epsilon}$ - константы турбулентности. Тогда формула для расчета турбулентной вязкости преобразуется:

$$v_t = C_{\mu} k^2 / \epsilon. \quad (19)$$

Накоплен опыт работы с этой моделью в основном для течений, в которых свойство жидкости изменяется мало. Приведенный выше метод определения турбулентности практически не пригоден для расчетов вблизи стенок. Поэтому на внутренней границе предлагается учитывать либо гипотезу Прандтля, либо в уравнение переноса для k и ϵ вводить дополнительные члены, чтобы распространить область применимости на вязкий подслой. Последний способ особенно популярен для сложных турбулентных течений, как например, для течений с сильно изменяющимися свойствами жидкости. Исходя из исследований Сполдинга, Лаундера предложено ввести члены уничтожения в k - уравнение и член порождения в ϵ -уравнение. Значения k и ϵ полагают нулями на стенке. На входном

отверстии для расчетов второго и третьего видов течения задаются условия:

$$k_T = 1,5 Tu \sqrt{\frac{v}{m}}; \quad \varepsilon_T = C_{\mu}^{3/4} k^{3/2} / l; \quad [0, Rl, \quad (20)$$

Проводя исследования турбулентности для ковшевой металлургии, Дж.Секели на основании сравнения расчетных и экспериментальных данных предложил следующие константы турбулентности:

$$C = 0,09, \quad C = 1,44, \quad C = 1,92, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1,3, \quad \sigma_T = 0,9.$$

Т.о. двухпараметрическая модель турбулентности состоит из уравнений (10)-(12), (15), (18), (19) и условий (20). Сопоставление результатов ВЭ, выполненных на основе одно- и двухпараметрической модели турбулентности, свидетельствует об их удовлетворительном согласовании (рис.1, а, б, в, кривые 2 и 3). Однако, учитывая громоздкость $k-\varepsilon$ модели и более значительные затраты машинного времени при ее численной реализации, для инженерных расчетов прикладных задач в областях несложной конфигурации следует отдать предпочтение однопараметрической модели.

Четвертая глава посвящена исследованию турбулентности в период наполнения изложницы как при разливке сверху, так и снизу.

На основании моделирования разливки спокойной стали сверху в изложницу для 21-тонного уширенного кверху слитка с прибыльной надставкой показано, что гидродинамические и теплофизические процессы наполнения изложницы соответствуют закономерностям поведения неизотермической струи в ограниченном пространстве. Влияние турбулентной вязкости (рис.2) способствует уменьшению глубины проникновения струи вглубь расплава на 40% при массовой скорости поступления расплава в изложницу 1000 кг/мин и перегреве 60°C (рис.3). Зона активного влияния струи занимает 45% объема расплава и локализуется в верхней части расплава; зона влияния тепловой конвекции - составляет 55% объема полости изложницы. Влияние турбулентности приводит к росту твердой корочки, особенно в нижней пристеночной области на 10% (рис.4, а)

Учет газозахвата и турбулентности в совокупности уменьшает глубины проникновения струи вглубь расплава на 48% при содержании газовой фазы 20%; и росту "твердой корочки" в нижней части

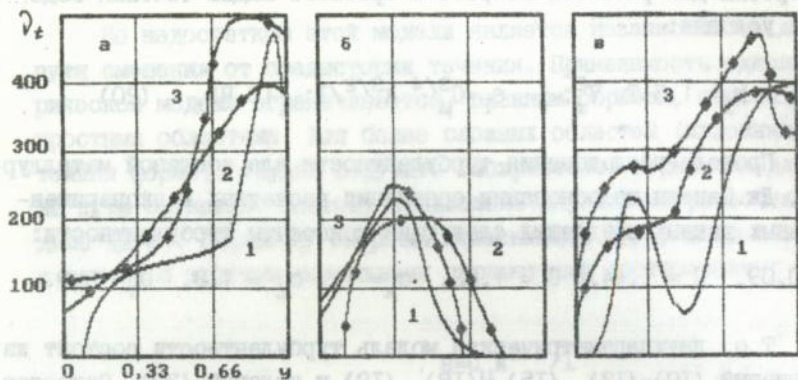


Рис.1. Распределение турбулентной вязкости по горизонтальному сечению области: а - при естественной конвекции; б - при вынужденной, в - при смешанной, 1 - практическая модель замыкания турбулентности, 2 - k-ε - модель; 3 - k-ε - модель.

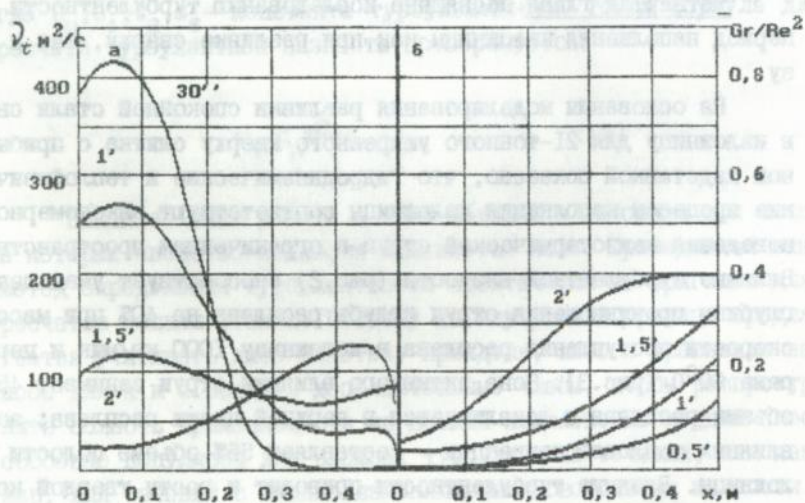


Рис.2. Распределение турбулентной вязкости по горизонтальному сечению области (а) и значений Gr/Re^2 в различные моменты времени на высоте 1 м от дна излучника.

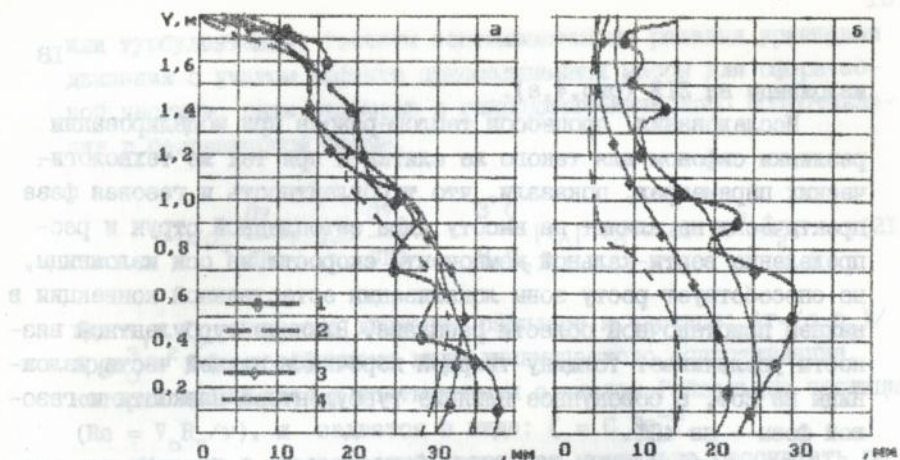


Рис. 3. Толщина твердой корочки по высоте 15,3-тонного слитка при разливке сверху (а) и сифоном (б): кривая 1 - результаты эксперимента (В.А.Ефимова), 2 - расчет без учета турбулентности, 3 - с учетом турбулентности, 4 - с учетом турбулентности и газозахвата.

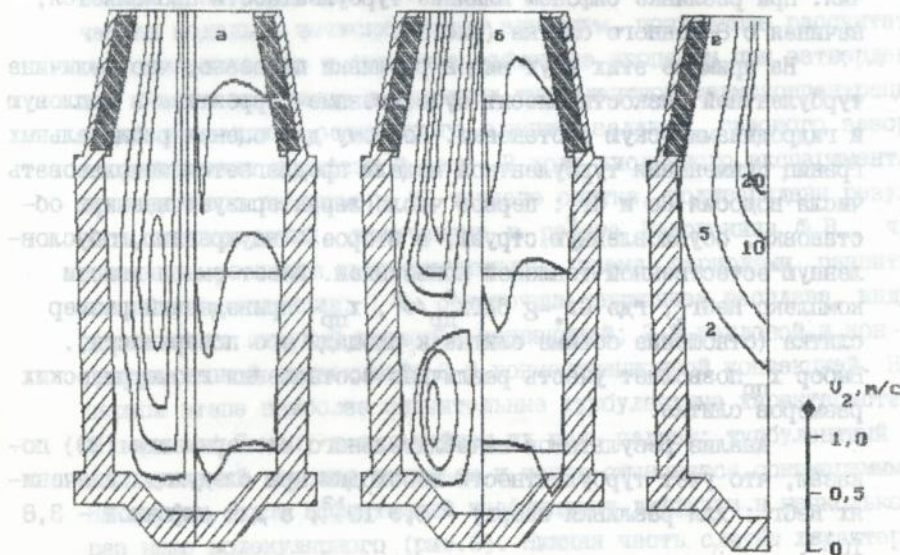


Рис. 4. Линии функции тока и эпюры вертикальной компоненты скорости: а - без учета газозахвата, б - с учетом газозахвата, в - распределение газовой фазы по сечению области.

изложницы на 21% (рис.4,а).

Исследования процессов теплопереноса при моделировании разливки сифоном для такого же слитка и при тех же технологических параметрах, показали, что турбулентность и газовая фаза практически не влияют на высоту ядра затопленной струи и распределение верти-кальной компоненты скорости на оси изложницы, но способствует росту зоны локализации естественной конвекции в нижней пристеночной области расплава. Влияние турбулентной вязкости увеличивает толщину твердой корочки в нижней части изложницы на 25%, а совокупное влияние турбулентной вязкости и газовой фазы - на 40%.

Сравнение с экспериментом показало (рис.3,б), что при учете влияния газовой фазы и турбулентной вязкости результаты становятся адекватными.

Исследования, проведенные для этапа наполнения изложницы расплавом, показали, что при разливке сверху, уже начиная с однотонного слитка, учет турбулентности заметно сказывается на толщину твердой корочки. Увеличение массы усиливает эти различия. При разливке сифоном влияние турбулентности проявляется, начиная с 8-тонного слитка (рис.5).

На примере этих двух видов разливки показано, что величина турбулентной вязкости вносит существенные коррективы в тепловую и гидродинамическую обстановки. Поэтому для оценки рациональных границ применения турбулентной модели предлагается использовать числа подобия Re и Gr_* : первое число характеризует внешнюю обстановку, обусловленную струей, а второе - внутреннюю, обусловленную естественной тепловой конвекцией. Имеет смысл ввести комплекс $ReGr_*$, где $Gr_* = g \beta \Delta T x_{пр}^3 / \nu^2$, $x_{пр}$ - приведенный размер слитка (отношение объема слитка к площади его поверхности). Выбор $x_{пр}$ позволяет учесть различные соотношения геометрических размеров слитка.

Анализ результатов вычислительного эксперимента (ВЭ) показал, что учет турбулентности необходим при следующих значениях $ReGr_*$: для разливки сверху - $8,9 \cdot 10^{12}$, а для сифонной - $3,8 \cdot 10^{13}$.

Изучена гидродинамика неметаллических частиц в расплаве в зависимости от режимов наполнения (сверху, снизу, ламинарный

или турбулентный). Расчеты основываются на решении уравнения движения с учетом эффекта присоединенной массы для сферической частицы, силы Архимеда и гидродинамического сопротивления в безразмерной форме.

$$\rho/\rho_{\text{ч}} \frac{\partial v_1}{\partial Fo} + 0.5 \frac{\partial v_0}{\partial Fo} = - \frac{3 \zeta}{8 \Gamma_{\text{ч}}} |v_0| v_0 + \text{Ar} \text{Pr}^2 \frac{1}{2}; \quad (21)$$

где v_1 и v_0 - скорость движения расплава и частицы; $\text{Ar} = (\rho - \rho_{\text{ч}}) / \rho_{\text{г}} g R_{\text{ч}}^3 / \nu^2$, ζ - коэффициент гидродинамического сопротивления, который выбирается в соответствии с числом Рейнольдса частицы ($\text{Re} = v_0 R_{\text{ч}} / \nu$), и задается в виде: $\zeta = C \text{Re}^{-n}$.

Методика исследований позволяет правильно рассчитать рациональные режимы разливки с целью вывода частиц в прибыльную часть слитка или отливки.

Пятая глава посвящена особенностям турбулентного теплообмена в расплаве при затвердевании слитка; определению границ применения бесконвективных моделей, ламинарных и с учетом турбулентной вязкости; оценке роли пространственного фактора в период затвердевания стального слитка. Разработаны математическая модель и вычислительный алгоритм, позволяющие рассчитать гидродинамические и теплообменные процессы при затвердевании стального слитка в условиях турбулентной термоконцентрационной конвекции, остаточного влияния заливки, газового затора в приближении двухфазной зоны. В ходе численного эксперимента, проведенного на примере 21 тонного слитка, подтверждены результаты исследований, полученных в работе Недопекина Ф.В., что движение расплава характеризуется тремя периодами развития смешанной конвекции: 1-й- остаточным движением расплава, индуцированного струй и тепловой конвекцией; 2-й-тепловой и концентрационной конвекцией; 3-й-концентрационной конвекцией. На первом этапе наиболее значительные турбулентные характеристики в первые 4-5 мин, в дальнейшем их роль падает: турбулентный и молекулярный перенос импульса и тепла становятся соизмеримыми. На первом этапе эффективный коэффициент диффузии в несколько раз выше молекулярного (рис.6). Нижняя часть слитка характеризуется более немонотонным характером распределения примеси. Однако уже в конце первого этапа эффективный коэффициент диф-

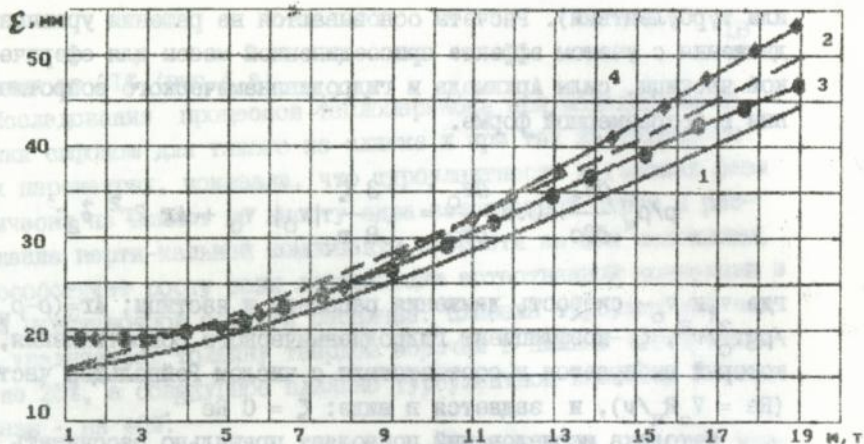


Рис. 5. Зависимость средней толщины твердой корочки от тоннажа слитка при разливке сверху: 1 - без учета турбулентности, 2 - с учетом турбулентности; при разливке снизу: 3 - без учета турбулентности, 4 - с учетом турбулентности;

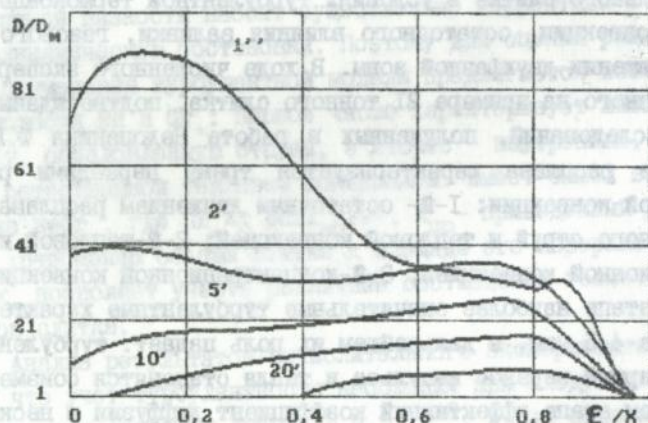


Рис. 6. Изменение коэффициента турбулентной диффузии вдоль координаты X .

фузии становится соизмеримым с молекулярным и его влияние практически не сказывается на процессах массопереноса в слитке (рис.7).

На основании анализа влияния турбулентной вязкости на среднюю толщину "твердой корочки" по высоте слитка показано, что турбулентная вязкость вносит существенные коррективы в тепловую и гидродинамическую обстановку в расплаве.

Показано, что при моделировании затвердевания стальных слитков, учет конвекции необходим при $Ra_* > 1,5 \cdot 10^6$, а турбулентной при $Ra_* > 5 \cdot 10^8$.

Построена диаграмма выбора турбулентной, ламинарной и бесконвективной модели формирования слитка (рис.8). Диаграмма позволяет установить границы применимости системы уравнений (I)-(8) от числа Ra_* ($\chi_{пр}$, ΔT). При $Ra_* > 5,4 \cdot 10^8$ реализуется турбулентный теплообмен, описываемый системой уравнений (I)-(8). При $10^6 < Ra_* < 5,4 \cdot 10^8$ режим течения становится ламинарным и описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)\vec{V} = \nu \nabla^2 \vec{V} + g\beta_T T + g\beta_C C + gC_T - \frac{1}{\rho} \nabla P,$$

$$\vec{\nabla} \vec{V} = 0,$$

$$\text{ср} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)T \right] = \nu \Delta T,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V}\nabla)C = \nu \Delta C.$$

При $Ra_* < 10^6$ можно пренебречь конвективным переносом в затвердевающем расплаве, при этом перенос тепла и массы осуществляется диффузионным путем и описывается уравнением теплопроводности и диффузии:

$$\text{ср} \frac{\partial T}{\partial t} = \nu \Delta T,$$

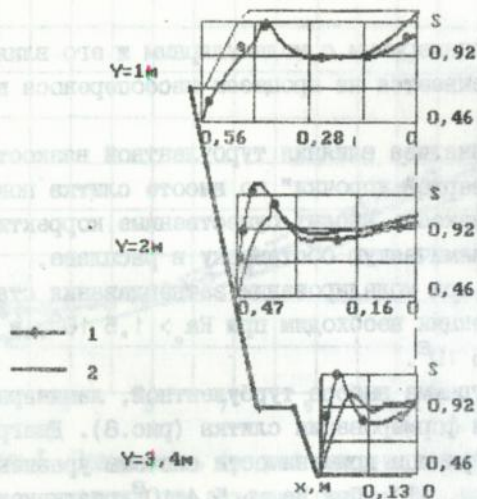


Рис.7. Распределение примеси углерода в твердой фазе: 1 - с учетом турбулентной вязкости, 2 - без учета.

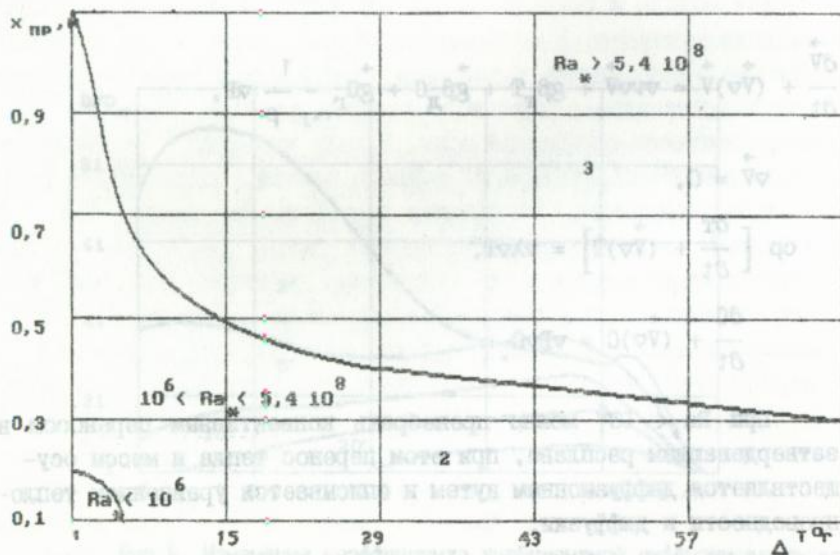


Рис.8. Диаграмма выбора математической модели в зависимости от приведенного размера слитка и перегрева: 1 - бесконвективная, 2 - ламинарная конвекция, 3 - турбулентная.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla D \nabla C,$$

Определено время интенсивного влияния естественного ламинарного и турбулентного конвективного теплообмена на гидродинамические и тепломассообменные процессы в затвердевающем слитке. Получены критериальные зависимости для определения рационального времени применения ламинарной и турбулентной модели конвекции в зависимости от основных технологических параметров слитка. На основании статистической обработки результатов ВЭ получена следующая формула для определения времени существования конвекции в расплаве в период его затвердевания:

$$Fo_k = 5,39 Ra_* 10^{-0,15}$$

Для определения временного интервала существования конвекции в турбулентном режиме построена зависимость:

$$Fo_t = 0,208 Ra_* 10^{-0,068}$$

В шестой главе разработаны математические модели, вычислительный алгоритм и программное обеспечение для исследования гидродинамических и тепломассообменных процессов при затвердевании слитков с внутренним холодильником. Модель и пакет прикладных программ позволяют исследовать гидродинамические и теплообменные процессы в системе расплав - изложница в период наполнения изложницы, гидродинамические и теплообменные процессы в системе холодильник - расплав - стенка изложницы - окружающая среда при формировании стального слитка.

Исследования показали, что:

1. Для 11 тонного слитка 10-миллиметровый холодильник из низкоуглеродистой стали расплавляется на 60% уже в период разливки. Начиная с 20мм до 60мм холодильник расплавляется в период формирования расплава. При размере стороны квадратного холодильника больше 60 мм последний не растворяется.
2. Остаточное воздействие струи сократилось в 2,5 раза для слитка с 20-миллиметровым холодильником; также сократилась длительность существования первого этапа развития конвекции

(снятие перегрева).

3. Снижение интенсивности перемешивания при наличии холодильника приводит к более равномерному распределению твердой корочки, что улучшает термическую обстановку в прикорковом слое.

4. Уменьшение турбулентной вязкости в 40 раз происходит на 1,1 мин. после начала затвердевания для 21-тонного слитка со 100-миллиметровым холодильником.

Диаграмма выбора турбулентной, конвективной и бесконвективных моделей затвердевания обычного слитка вполне работоспособна применительно к слиткам с внутренними холодильниками. Определяющие критерии для турбулентного и ламинарного перемешивания имеют те же значения, что и для обычного слитка. Отличие заключается в выборе $x_{пр}$. Если для обычного слитка $x_{пр}$ выбирался на основании размеров слитка, то в случае с холодильником рассчитываются площади поверхности и объем не всего слитка, а заполненной расплавом части слитка.

Анализ поведения расплава и холодильников для различных слитков показал, что если площадь поверхности холодильника не превышает 6% поверхности слитка, то холодильник растворяется, если больше, то не расплавляется.

Введение даже нерасплавляемого холодильника приводит к более быстрому остыванию центра слитка, причем поверхность слитка остывает до 1100 - 1200°C. Тогда как без холодильника температура поверхности у обычного слитка (при температуре в центре 1390°C) не превышает 990-1000°C. Это значительно снижает энергозатраты при прогреве слитка в колюще перед прокаткой.

Учет газового зазора на границе холодильник-расплав приводит к меньшему прогреву холодильника на 20 - 30°C, а значит, к его более позднему растворению.

Сравнение результатов численного расчета с расчетами, проведенными в работах Скворцова А.А., показали удовлетворительное совпадение результатов (таблица. I).

Таблица I.

Толщина металла на холодильнике,
намерзшего к моменту затвердевания

диаметр холодильника, мм	3	5	7	10	15	20	25	30	40
толщина металла расчет (6.3), мм	1,75	2,95	4,10	6	8,75	12	14,5	17,5	43,5
толщина металла числен.расчет, мм	1,8	3,01	4,17	6,2	9,0	12,3	14,8	17,8	43,9

Для оптимизации процессов в слитке предложены два критерия. Первый - J_1 вводится из требований небольших градиентов температур по толщине корочки слитка для предотвращения образования поверхностных трещин и искажения профиля слитка

$$J_1 = \int_{\varepsilon}^{1_x} \int_{\varepsilon}^{1_y} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] dx dy.$$

Второй критерий J_2 - определяет объем жидкой лунки. Минимальность J_2 необходима для уменьшения осевой ликвации и пористости.

$$J_2 = \int_0^{1_y} \xi dz.$$

Исследования показали, что наличие холодильника, имеющего 1% относительной площади, приводит к уменьшению термических напряжений (уменьшению критерия J_1) на 4%, а уменьшение осевой

ликации (критерий J_2) - на 5%. Это объясняется уменьшением градиента температур в пристеночной области за счет теплоотвода стержнем и уменьшения ширины двухфазной зоны. Увеличение относительной площади стержня улучшает перечисленные свойства слитка (Таблица 2)

Таблица 2.

Изменение критериев J_1 и J_2 в зависимости от относительной площади холодильника

относительная площадь холодиль. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9
величина критерия J_1	4,0	4,7	5,0	5,5	6,2	7,1	7,8	8,4	9,1
величина критерия J_2	5,0	5,2	5,3	5,5	5,7	5,8	6,0	6,1	6,2

В седьмой главе Разработана математическая модель и вычислительный алгоритм, позволяющие рассчитать гидродинамику и теплоперенос в центробежной биметаллической отливке в период заливки металла и формирования отливки.

Т.к. рассматривается длинномерная отливка, то при формулировке уравнения энергии учитывается двумерный характер в многосвязной области - кокиль - песочная подушка - многослойная отливка:

$$c_s \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda_s \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

Согласно критерию Gr/Re^2 был оценен вклад тепловой конвекции. Так, в неподвижном кокиле в период заливки величина этого критерия при $Gr=1,7 \cdot 10^8$ составляет 0,044 (это означает, что

вклад тепловой конвекции существенно влияет на теплоперенос), а во вращающемся — $Gr/Re^2 = 2,95 \cdot 10^{-5}$, т.е. гидродинамический фактор значительно преобладает над тепловым. Это позволило упростить гидродинамическую постановку задачи:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (rV_r \omega)}{\partial r} + \frac{\partial (V_z \omega)}{\partial z} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \nu \frac{\partial \omega}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \frac{\partial \omega}{\partial z} \right]$$

где V_r и V_z — радиальная и горизонтальная компоненты скорости, t — время счета, r и z — радиальная и горизонтальная координаты.

Проведено численное исследование температурных полей в системе: 1) слиток-форма при последовательной заливке металлов с различным содержанием углерода; 2) затвердевающий слиток-форма; 3) остывающий слиток-внешняя среда после извлечения слитка из формы, а также выполнен расчет термических напряжений в остывающей ЦБ. Проведен анализ различных режимов заливки, затвердевания и охлаждения отливки ЦБЛ.

Установлено, что:

- неучет турбулентной вязкости при линейной скорости вращения кокиля 17 м/с приводит к заметному увеличению времени затвердевания отливки.
- заметное снижение уровня термических напряжений наблюдается при естественном и вынужденном в подвешенном состоянии видах охлаждения, охлаждение же отливок на дне колодца может привести к возникновению продольных (вдоль оси отливки) трещин и даже к отслоению слоев биметаллической отливки вследствие превышения значений предела прочности σ_0 суммарными напряжениями σ_m на границе слоев и внутренней поверхности отливки;
- причиной возникновения трещин является неравномерное распределение температуры как вдоль радиуса, так и вдоль продольной оси, возникающее вследствие волнообразного характера поверхности отливки, обусловленного, по-видимому, самой спецификой процесса центробежного литья биметаллических отливок;
- причиной возникновения трещин на границе слоев отливки ЦБЛ при определенных условиях охлаждения является существенное отличие значений пределов прочности металлов биметаллической отливки при одной и той же температуре ($\sigma_{02}/\sigma_{01} \approx 1,5$);
- избежать либо уменьшить вероятность образования трещин можно

за счет подбора оптимальных частоты вращения формы, расхода заливаемых металлов, времени выдержки между заливкой первого и второго металлов, толщины песчаной подсыпки, момента начала и температуры внешнего водяного охлаждения; подбора марок заливаемых металлов таким образом, чтобы их теплофизические свойства (предел прочности, предел текучести, коэффициент температурного линейного расширения и т. д.) имели как можно более близкий характер зависимости от температуры.

Сравнение полученных данных с имеющимися литературными и экспериментальными данными указывает на то, что предложенная математическая модель дает удовлетворительные количественные оценки величин, характеризующих процесс заливки, затвердевания и охлаждения цилиндрической отливки ЦБЛ, а также позволяет прогнозировать процесс трещинообразования путем анализе термонапряженного состояния отливки ЦБЛ.

Полученные данные служат рациональной технологии и определению параметров технологического производства отливок ЦБЛ.

В заключении сформулированы и даны практические рекомендации о характере вынужденной конвекции при формировании стальных слитков. Сформулированы основные выводы о закономерностях развития турбулентной конвекции, теплообменных процессов и двухфазной зоны при наполнении расплавом изложницы и затвердевания слитка; о динамике неметаллических частиц в расплаве, поведении газовой фазы и ее влиянии на кинетику затвердевания; о границах применимости турбулентных моделей в зависимости от тоннажа слитка, технологических параметров и способа разливки. Кроме того, такие же рекомендации даны и для определения границ применения бесконвективной, ламинарной и турбулентной моделей при затвердевании слитка.

Приведены результаты расчетов гидродинамических и теплообменных процессов в биметаллическом слитке и отливке, а также в слитке с внутренним холодильником.

В приложении диссертации приводятся материалы, подтверждающие практическое использование полученных результатов в народном хозяйстве, в учебном процессе в качестве методических разработок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена важная научная проблема по разработке методов моделирования, адекватно отражающих взаимобусловленные процессы гидродинамики, турбулентного теплопереноса и затвердевания при формировании слитков в изложнице. Сформулированы математические модели:

- гидродинамических и теплофизических процессов при наполнении расплавом изложницы с учетом турбулентной вязкости, газозахвата струей и позволяющей определить динамику неметаллических частиц, внесенных в расплав струей и смытых со стенок изложницы;

- сопряженной задачи гидродинамики турбулентного теплопереноса, наличия газового зазора между стенкой изложницы и твердой корочкой в приближении двухфазной зоны, рассчитанной методом неравновесного рычага;

Во всех перечисленных постановках учтены следующие факторы: неоднородное распределение доли твердой фазы (ДФЗ), различие теплофизических свойств твердой и жидкой фазы, наличие турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии, движение расплава вследствие механического воздействия струи, теплового и концентрационного градиентов, газовый зазор между стенкой изложницы и твердой корочкой.

Исследованы различные модели и методы их реализации, позволяющие учитывать турбулентность. Выявлено, что наиболее приемлемой моделью расчета турбулентности при расчете теплообменных процессов в формирующемся слитке является $k-\epsilon$ модель.

Определена методика расчета односкоростной модели, позволяющей учесть влияние газозахвата в период наполнения изложницы как сверху, так и снизу.

На основании анализа результатов вычислительных экспериментов (ВЭ) получено:

- влияние турбулентной вязкости способствует уменьшению проникновения струи вглубь расплава на 40% при массовой скорости поступления расплава в изложницу 1000 кг/мин и перегреве 60°C;
- зона активного влияния струи занимает 45% объема расплава и локализуется в верхней части расплава; зона влияния тепловой

конвекции составляет 55% объема полости изложницы;

- влияние турбулентности приводит к ускорению роста твердой корочки особенно в нижней пристеночной области на 10%;
- учет газозахвата и турбулентности в совокупности приводят к уменьшению глубины проникновения струи вглубь расплава на 48% (при содержании газовой фазы в струе 20%) и росту "твердой корочки" в нижней части изложницы на 21%.
- влияние турбулентности и газовой фазы практически не сказалось на высоте ядра затопленной струи и распределении вертикальной компоненты скорости на оси изложницы, где при этом усиливается влияние естественной конвекции в нижней пристеночной области;
- влияние турбулентной вязкости увеличивает толщину твердой корочки в нижней части изложницы на 25%, а совокупное влияние турбулентной вязкости и газовой фазы - на 40%.

Определены рациональные режимы получения качественной биметаллической центробежнолитой заготовки.

Разработанные методики, алгоритмы, программные обеспечения, рациональные режимы и параметры, позволяющие получать качественные стальные изделия и совершенствовать технологический процесс, внедрены в ДонНИИЧермете, ВПФ "Металл" (г. Донецк), ИЧМ НАН Украины, УкрИИТЭК, ПО "Невский завод", Донбассканал "Северский Донец-Донбасс" с суммарным экономическим эффектом 100 тыс. руб по ценам 1990г.

Разработанные программные обеспечения внедрены в учебный процесс в Донецком госуниверситете по курсу "Вычислительные методы в процессах переноса", "Вычислительные методы в экологии", "Тепло- и массопереносу". В Днепродзержинском государственном техническом университете по курсу "Теория литья".

Литература

1. Огурцов А.П., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания.- Днепродзержинск: ДГТУ, 1994.- 180с.
2. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., Куликов И.В. Численное ис-

- следование гидродинамических и теплофизических процессов при разливке стали сверху.- Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1984, N 7.-С.56-59.
3. Численное исследование гидродинамики расплава при сифонной заливке/ С.П.Ефименко, Ф.В.Недопекин, П.Ф.Завгородний, В.В.Белусов// Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1981, N 12, С.63-66.
 4. Белусов В.В., Недопекин Ф.В., Куликов И.В. Численное исследование теплообмена и гидродинамики заполнения изложницы при разливке сверху // Изв.АН СССР. Металлы, 1985, N 3, с.82-87
 5. Повх И.Л., Недопекин Ф.В., В.В.Белусов Математическое моделирование гидродинамики, тепло и массопереноса в системе затвердевающий слиток-изложница//ДАН УССР, сер. А, 1986, N 9, с.82-85
 6. Недопекин Ф.В., Белусов В.В.Влияние газового зазора на процессы происходящие в затвердевающем расплаве.// Изв. ВУЗов. Черная металлургия, 1986, N 7, С.157-158
 7. Недопекин Ф.В., Белусов В.В., Ковтун Д.Н. Численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в период заполнения литейной формы// Изв.ВУЗов Черная металлургия, 1988, N 5, С.153-154
 8. Недопекин Ф.В., Белусов В.В. Численное моделирование распределения примеси в затвердевающей слитке./ Изв.ВУЗов Черная металлургия, N 11, 1986, С.152-153
 9. Недопекин Ф.В., Белусов В.В., Солонярь А.Е.Численное исследование движения расплава после заполнения изложницы./ Изв. ВУЗов.Черная металлургия, 1984. N 11, с.131-132.
 10. Недопекин Ф.В., Белусов В.В., Солонярь А.Е. Математическое моделирование термоупругих напряжений в затвердевающей слитке/ Промышленная теплотехника, т.10, 1988, N 1, с.48-62
 11. Моделирование рациональной конфигурации поперечного сечения блямингового слитка/Недопекин Ф.В., Белусов В.В., Боруменская А.Е., и др. - Изв.АН СССР. Металлы 1988, N 5. с.81-88
 12. Математическое моделирование гидродинамики заполнения литейной формы/Недопекин Ф.В., Белусов В.В.,Примак И.Н.и др. - Изв.ВУЗов Черная металлургия.-N 9, 1988-С.120-123

13. Математическое моделирование процессов затвердевания отливки/ Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Ковтун Ю.Н., Гриценко А.Я. - Литейное производство N10, 1989- С.10
14. Численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в затвердевающей стальной слитке./Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гриценко А.Я.- Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1991, N 7 с.70-73.
15. Формирование выбросов при наполнении ковша чугуном/ Я.М. Левитасов, Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов и др./Изв.ВУЗов. Черная металлургия. 1988. N 1 с.13-17.
16. Повх И.Л., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В.Теплоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности./ ИЖ, 1994, т. 67 N 3-4. с. 202-208.
17. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Ховайло О.В.Математическое моделирование разливки стали с учетом газозахвата/ Изв. ВУЗов. Черная металлургия. 1995. N 1 с.12-14
18. Повх И.Л., Недопекин Ф.В., В.В.Белоусов Гидродинамика и теплоперенос при формировании стального слитка// ДАН Украины, сер. А, 1995, N 7, с.48-51.
19. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В.Сопряженная задача гидродинамики и теплопереноса в системе слиток-изложница.- Теорет. и прикл. механика: Республиканский межвуз. науч.-техн. сб.,1986, вып 17, с.111-116.
20. Математическое моделирование термонапряженного состояния затвердевающего бинарного слитка//Недопекин Ф.В., Белоусов В.В.,Крупшан Л.И. и др.Теор. и прикл.механика, Киев-Донецк: Вища школа, 1987, с. 123-127
21. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Белоусов В.В.Затвердевание отливки с легкоотделяемой прибылью- Теор. и прикл. механика. Харьков- Донецк, 1989-С.103-106
22. Гидродинамика и теплофизика наполнения литейной формы и затвердевания отливки/Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Ковтун Ю.Н. и др.- Процессы разливки модифицирования и кристаллизации стали и сплавов (Всесоюз. конф. по проблемам стального слитка. ч.1. Волгоград 1990. с.142-144
23. Недопекин Ф.В., Петренко С.С., Белоусов В.В. Сопряженная

- задача теплообмена и гидродинамики в затвердевающем бинарном расплаве// В кн. Теплообмен. 1984. т.1, вып.7. с.128-132.
24. Белоусов В.В. Исследование влияния заливочной струи на теплообмен в затвердевающей слитке.// В кн. Усовершенствование процессов разлива стали в слитки. Киев. 1987, Дип.в.ВИНИТИ N 8086-В37
 25. Математическое моделирование термических напряжений в затвердевающей билингвальной слитке в зависимости от конфигурации поперечного сечения/ Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., Крупман Л.И./ Проблемы сталеного слитка. В сб.науч.трудов АН УССР.
 26. Способ обработки стальных слитков прямоугольного сечения на машинах непрерывной разлива/ Пилипенко В.Л., Поляков В.И., Белоусов В.В. и др. авт. свидет. 400806/31-02 ст.20.12.86
 27. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В., Жусов А.Н. Расчет гидродинамики и теплообмена при разливе уширенного сверху слитка/Донецк. ун-т, Донецк 1992,ОФАПМ России, N316, 22. 04.92
 28. Белоусов В.В., Боруменская А.Е., Манохина Г.Д. Расчет температурных критериев качества в затвердевающей слитке Донецк. ун-т, Донецк 1991,ОФАПМ СССР, N310,25.04.91
 29. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В.Расчет гидродинамических и теплообменных процессов при непрерывном литье стального слитка .Донецк. ун-т, Донецк 1992,ОФАПМ России, N318, 09.12.92
 30. Белоусов В.В., Недопекин Ф.В. Расчет гидродинамики и теплообмена при затвердевании уширенных сверху слитков/ Донецк. ун-т, Донецк 1992,ОФАПМ России, . N319,09.12.92
 31. Белоусов В.В., Боруменская А.Е., Недопекин Ф.В. Проектирование поперечного сечения заготовки// Литейное производство, 1991, №10, с.27.
 32. Недопекин Ф.В., Колесник В.И.,Белоусов В.В. Влияние воздуха инжектируемой струей металла на гидродинамику расплава при разливе сверху./ Дип в ВИНИТИ N 378К-ДВЗ.
 33. Повх И.Л., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Математическое моделирование процессов теплообмена при затвердевании бинарного расплава в условиях термоконцентрационной

- конвекции. / В кн. Теплообмен. Тез. доклада Минского международного форума. Минск 1988, т.1, с.79-81
34. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гриценко А.Я. Машинное моделирование химической неоднородности в затвердевающем стальном слитке. / Автоматизация прækтирования и управления качеством отливок. Материалы 4 конф. С.Петербург 1991, с.38-42.
35. Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гриценко А.Я. Математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов для энергомашиностроения Совершенствоование металлургической технологии в машиностроении. (2-я Всесоюз. конф.) Волгоград, 1991.-С.182-183
36. Машинное моделирование процессов формирования стального слитка/ Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Гриценко А.Я. и др.-Совершенствоование металлургической технологии в машиностроении. (1-я Всесоюз. конф.) Волгоград, 1990.-С.183-184
37. Belousov V.V., Nedopekin P.V. Hydrodynamics and heat and mass-transfer in the steel ingot mould system./ Heat and mass transfer technological processes. Abstracts of reports of Int.conf. Jurmala 1991. p.p. 73-74.

Annotation

Belousov V.V. Hydrodynamics and heattransfer in large steel ingots. Dissertation on submitted for a scientific degree of doctor of technical sciences on a speciality 05.14.06 - technical heattransfer, Institute techn heattransfer NAS Ukraine, Kiev of 1996., manuscript, 350p., 9 tables, 107 figures, bibliografy - 230 titles
There are 36 articles and monograph

Mathematical models of hydrodynamics, heatmasstransfer and solidification in a period of casting and formation of ingot in enabling to take into account influence of turbulence, entrap of gas and gasbacklash have been elaborated, justified and numerically realized.

A role of turbulence in process of casting and solidification of ingot appreciated. Borders of application turbulent, laminar or nonconvection of models of hydrodynamics and heat mass transfer in a period of casting and formation of ingot have been determined.

Mathematical models and computing algorithms have been formulated, numerical researches of hydrodynamic and thermal processes in mould with internal cooler, in bimetal ingot and in bimetal casting .

Аннотация

Белоусов В.В. Гидродинамика и теплоперенос в крупных стальных слитках. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06 - техническая теплофизика и 05.16.02 - Metallurgy черных металлов, Институт технической теплофизики НАН Украины, г.Киев 1996г., объем 350 листов., 9 таблиц, 107 рисунков, библиография - 230 названия. 36 статей и 1 монография.

Разработаны, обоснованы и численно реализованы математические модели гидродинамики, теплопереноса и затвердевания в период разлива и затвердевания слитка в изложнице, позволяющие учесть влияние турбулентности, газозахвата и газового зазора. Оценена роль турбулентности в процессе разлива и затвердевания слитка. Определены границы применения турбулентной, ламинарной или бесконвективной моделей гидродинамики и тепло-массо - обмена в период разлива и формирования слитка.

Сформулированы математические модели, вычислительные алгоритмы и проведены численные исследования гидродинамических и тепловых процессов в расплаве с внутренним холодильником, в биметаллическом слитке и в центробежнолитой биметаллической отливке.

Ключевые слова: виливниця, зливкі, гідродинаміка, математично модулювання

Ав 34088

Ав 34.088

Белюсов Вячеслав Владимирович

Подписано до друку 19 січня 1996р. Замовлення № 21

Тираж 100. Спосіб друку офсетний

ПО "Чайка", м. Донецьк-50, пр. Театральний, 13