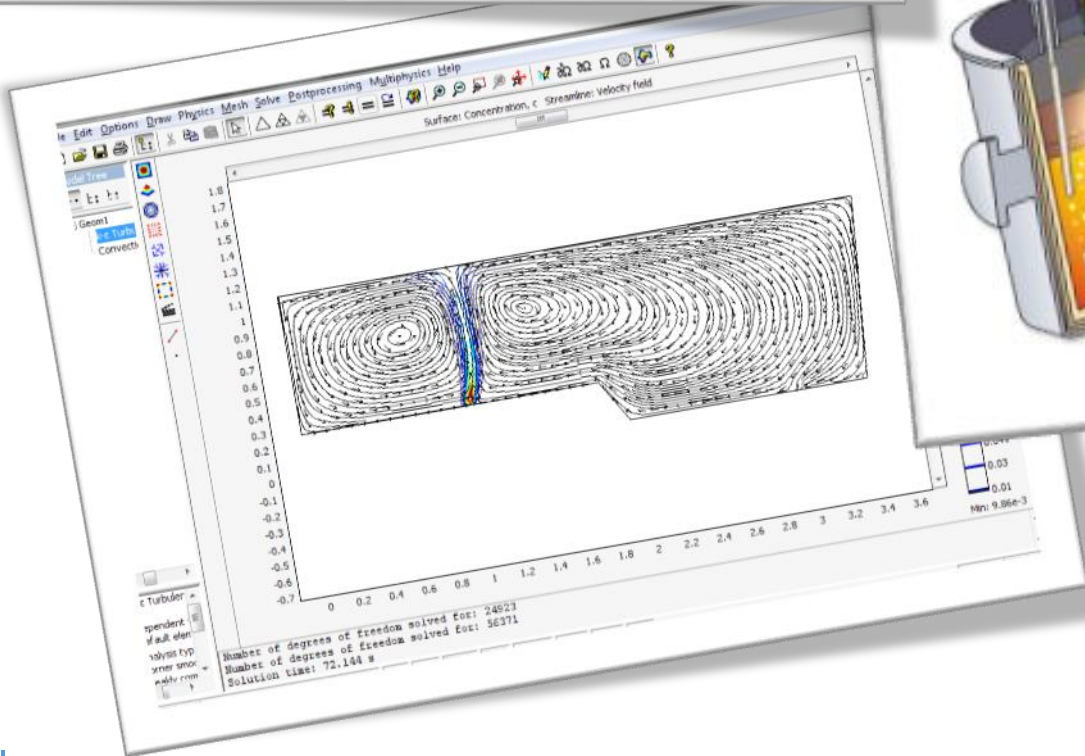
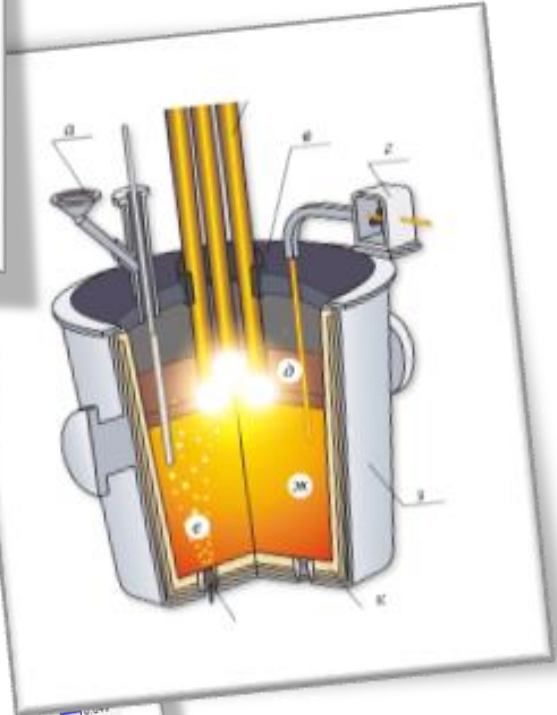
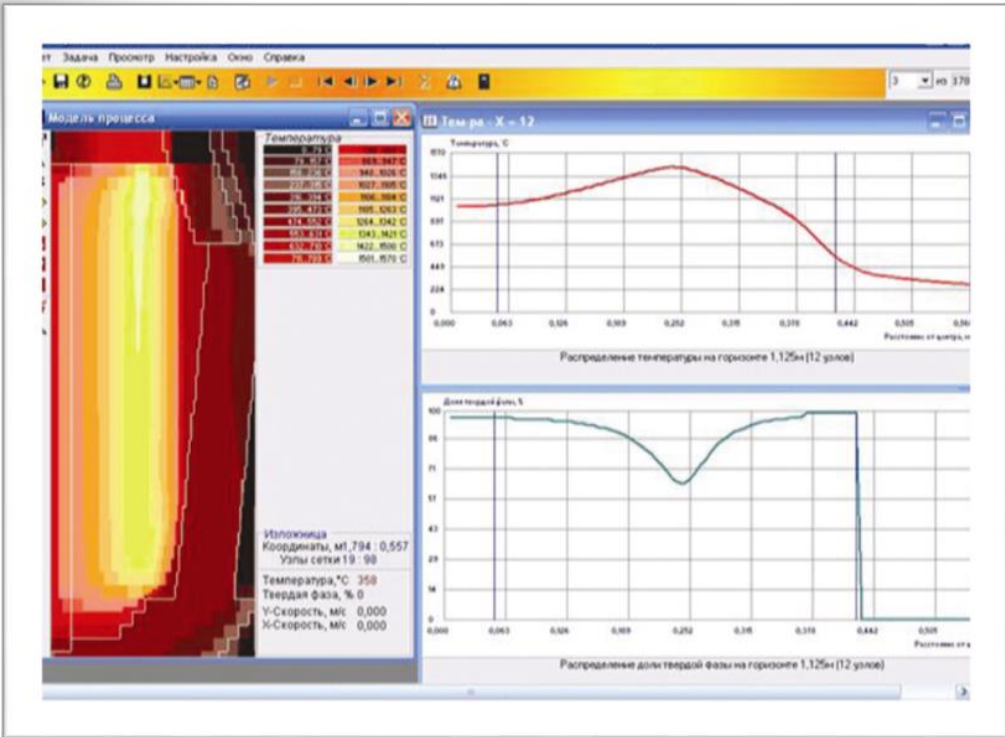


В.И. Бондаренко
В.Ф. Комаров
Ф.В. Недопекин
В.М. Мелихов
В.В. Белоусов



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МЕТАЛЛУРГИИ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ПРОЦЕССОВ,
МЕТРОЛОГИИ И ЭКОЛОГИИ

**В.И. Бондаренко, В.Ф. Комаров,
Ф.В. Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И
КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ
МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В
МЕТАЛЛУРГИИ**

Монография рекомендована к печати решением Ученого совета
физико-технического университета Донецкого национального университета
(выписка из протокола №4 от 20.12.2013)

Донецк
2013

УДК 536.42+621.746.5

В.И. Бондаренко, В.Ф. Комаров, Ф.В. Недопекин, В.М. Мелихов, В.В. Белоусов. Математическое обеспечение и компьютерные технологии для моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в металлургии. Донецк: ДонНУ, 2013.

Настоящая книга посвящена повышению эффективности математического моделирования и разработке пакетов прикладных программ расчета гидродинамических и тепломассообменных процессов при производстве металлургических изделий.

Материалы, изложенные в монографии, позволяют проследить весь путь от формулировки математических моделей, вычислительных алгоритмов до их компьютерных реализаций при формировании стальных и композитных слитков, а также процессов переноса в ванне промковша.

Книга может быть полезна для специалистов, студентов и аспирантов, работающих в области металлургии и математического моделирования теплофизических процессов.

Ил. 87, Библиогр: назв. 218

Рецензенты:

Зав.кафедрой прикладной математики Днепропетровского государственного технического университета, д.т.н., проф. С.Е. Самохвалов

Зав.кафедрой технической теплофизики Донецкого национального технического университета, д.т.н., проф. А.Б. Бирюков

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	7
1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ	8
1.1. Выбор модели турбулентности	10
1.2. Выбор моделей турбулентности для расчета теплофизических и гидродинамических процессов в затвердевающем слитке.....	17
1.3. Выбор границ применимости математической модели турбулентности при формировании стального слитка.....	23
1.4. Условия на границе	29
1.5. Оценка применимости математической модели	33
1.6. Адекватность применения предложенной математической модели 33	
1.7. Адекватность расчетных и экспериментальных данных	37
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	40
2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	45
2.1. Анализ пакетов прикладных программ формирования отливок 47	
2.2. Сравнительный анализ математического обеспечения для моделирования задач тепломассопереноса при затвердевании слитков 53	
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	60
3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ	62
3.1. Автоматизация проектирования программного обеспечения..	62
3.2. Проектирование интерфейса пользователя.....	79

3.3. Пользовательская работа с интерфейсом	90
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	96
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ СЛИТКОВ ТРУБНОЙ И КОЛЕСНОЙ СТАЛИ	97
4.1. Оценка влияния концентрационной конвекции	97
4.2. Гидродинамика процесса	97
4.3. Тепловые процессы	98
4.4. Кинетика затвердевания	99
4.5. Формирование усадочных раковин	100
4.6. Расчет усадочной раковины при различных технологических параметрах разлива слитка	102
4.7. Анализ технологических процессов производства слитков колесной стали	104
4.8. Теплофизические параметры разливаемой стали, литейной формы и утеплительных материалов	111
4.9. Адаптация математической модели	113
4.10. Гидродинамические и теплофизические процессы при разливе и формировании слитка	122
4.11. Влияние величины перегрева стали на глубину усадочной раковины	132
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	134
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ СЛИТКОВ	136
5.1. Постановка задачи	136
5.2. Адекватность результатов численного моделирования композитных слитков	138

5.3. Гидродинамические процессы при формировании композитных слитков	140
5.4. Теплофизические процессы при формировании композитных слитков	142
5.5. Макроструктура композитного слитка.....	147
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	154
6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ.....	155
6.1. Обзор существующих математических моделей гидродинамических, теплофизических и массообменных процессов в промежуточном ковше	155
6.2. Физическая постановка задачи	158
6.3. Математическая модель гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в промковше	163
6.4. Пример расчета задачи средствами пакета	170
6.5. Анализ результатов численного моделирования влияния энергетических характеристик движения расплава в промежуточном ковше	183
6.6. Оценка влияния продувки на тепловые потери и теплообменные процессы	188
6.7. Влияние турбулентной энергии расплава на процессы удаления неметаллических включений и теплообмена	191
6.8. Оценка тепловых потерь в промежуточном ковше	201
ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	204
7. ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАЛЬНЫХ СЛИТКАХ».....	210

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК	214
-----------------------	-----

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к промышленной продукции требуют внедрения новых технологий. Однако промышленное экспериментирование с металлургическими или машиностроительными изделиями является не только дорогостоящим, но и не всегда дает однозначный результат. Последнее связано с взаимообусловленными процессами, например для металлургии это трудно определяемое в промышленных условиях влияние гидродинамического фактора на тепловую обстановку при формировании слитка.

Лабораторные исследования высокоскоростных и высокотемпературных процессов в металлургии связаны с трудностями, предъявляемыми к выполнению критериев подобия.

Многомерные нелинейные уравнения переноса импульса и энергии не имеют надежного математического аппарата.

Поэтому надежным способом исследования является математическое моделирование. Однако кроме обоснованного математического аппарата и вычислительного алгоритма необходимо разрабатывать пакеты прикладных программ (ППП) с удобным для пользователя интерфейсом.

В связи с тем, что большинство решаемых в металлургии задач не имеют инженерных решений в связи с многофакторностью процессов, интерфейс для технолога должен иметь удобные входной и выходной потоки данных. Другой, не менее важной задачей является возможность изменения входных параметров без вмешательства в математическую модель и вычислительный алгоритм программного продукта.

Поэтому тема монографии, посвященная повышению эффективности разработки пакетов прикладных программ для моделирования гидродинамических и тепломассообменных процессов при производстве металлургических изделий, является актуальной и своевременной.

Рассмотренные в монографии вопросы соответствуют региональной программе развития Донецкой области до 2020 года.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

При моделировании процессов разливки, формирования и внепечной обработки металла необходимо учитывать не только теплофизические, но и гидродинамические и массообменные процессы. Выбор той или иной модели, учитывающей как гидродинамику, теплофизику так и массообменные процессы определяются рядом критериев. На этапах разливки металла в большие объемы (ковш, литейная форма, изложница, кристаллизатор) и дальнейшем его затвердевании на качество получаемых слитков и отливок определяющее влияние оказывают гидродинамические процессы. Значения чисел Рейнольдса (Re) [1] при этом соответствует турбулентным режимам течения расплава (так при разливке стали в изложницу со скоростью 1-4 м/с число $Re = 50000 - 200000$ [2]). Кроме того, в период разливки истекающая из ковша струя, захватывает определенное количество газа, что приводит к дополнительной турбулентности потоков. Поэтому в этой ситуации крайне необходим учет турбулентности. Для исследования процессов гидродинамики расплава, заливаемого в изложницу, выбраны две основные схемы движения металла: разливка сифоном и разливка сверху.

Вместе с тем, существуют такие режимы, когда влияние теплофизики не значительное. Например, разливка металла в двухручьевые промковши, размеры которого не способствуют образованию застойных зон, где возможно даже затвердевание металла. Определение аэродинамики воздуха при сливе чугуна из емкости в емкость. При задачах такого плана вязкостные процессы значительно преобладают над тепловыми.

При формировании высоких тонких слитков (слитки трубной и колесной стали) время активного гидродинамического процесса составляет 20 – 30% от времени всего формирования слитка (например, для 5 тонного 3-х метрового слитка колесной стали КП-2 время формирования от разливки до освобождения от изложницы составляет 3,5 – 4 часа). Таким образом, при исследовании такого объекта сопряженную задачу гидродинамики и теплофизики решают порядка 1,5 часов реального времени. Остальные 2 – 2,5 часа решаются только с помощью уравнения теплопереноса.

Для описания процессов переноса импульса, тепла и массы в расплаве предложена математическая модель, состоящая из уравнений движения, неразрывности, переноса тепла и массы, газовой фазы, турбулентной кинетической энергии (k), скорости ее диссипации (ϵ), а также уравнения для доли твердой фазы ξ :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = \nabla v_s \nabla \vec{V} + \vec{g} \beta_T (T - T_0) + \vec{g} \beta_D (C - C_0) + f_v +$$
$$+ \frac{3 \beta \xi (V_{z,z} - V_{m,z})^2}{8 R_0} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad ; \quad (1.1)$$

$$\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T \right] = \nabla \lambda_3 \nabla T; \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) C = \nabla D_3 \nabla C; \quad (1.3)$$

$$\nabla \vec{V} = 0; \quad (1.4)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial t} + \vec{V}_2 \cdot \text{grad} \beta = f_\beta; \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) k = \nabla v_3 \nabla k + G - \bar{g} \beta_T (T - T_0) - \bar{g} \beta_C (C - C_0) - \varepsilon; \quad (1.6)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \varepsilon = \nabla v_3 \nabla \varepsilon + C_1 v G - \frac{\varepsilon}{k} \frac{v_t}{\sigma_t} \bar{g} \beta_T (T - T_0) - \varepsilon^2 / k; \quad (1.7)$$

$$\xi(y) = 1 - \left(1 + \frac{c}{W} (T_l - T_s) \right) \left[1 - \left(\frac{T_l - T}{T_l - T_s} \right)^{2/3} \right] + \frac{c}{W} (T_l - T_s), \quad (1.8)$$

где \vec{V} – скорость расплава, $v = v_t + v$ – эффективная, v – кинематическая, $v_t = k^2 / \varepsilon$ – турбулентная вязкости; β_T , β_D – тепловой и диффузионный коэффициенты объемного расширения; C – концентрация примеси (углерода), C_T – концентрация газовой фазы; $\lambda_3 = \lambda + \lambda_t$ – эффективная, λ молекулярная и $\lambda_t = v_t / 0,9$ – турбулентная теплопроводности; G – диссипативный член; T_0 , T_L – температуры начальная и ликвидус; k – турбулентная энергия, ε – скорость диссипации турбулентной энергии, β – содержание газовой фазы.

При определении источникового члена f_β допускается, что, попадая в металл со струей, газ дробится на пузырьки одинакового радиуса и это происходит в области объемом V_β . Тогда в точках, принадлежащих области V_β :

$$f_\beta = \frac{Q_V}{\rho_2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot V_\beta},$$

здесь Q_V – объемный расход газа, R_0 – начальный радиус пузырька, V_β – скорость движения газовой фазы. В точках, не принадлежащих V_β , $f_\beta = 0$.

Источниковый член, позволяющий учитывать разность скоростей жидкой $V_{ГЗ}$ и газовой фаз $V_{МЗ}$ в уравнении Навье-Стокса определяется следующим образом [3]:

$$f_V = \frac{3}{8} \frac{\beta \xi (V_{ГЗ} - V_{МЗ})^2}{R_0},$$

Математическая модель базируется на принципах макроконтинуальной механики многофазных сред и теории квазиравновесной двухфазной зоны [3, 4]. Модель учитывает турбулентность, газозахват расплавом (в период наполнения изложницы и литейных форм), тепловую и смешанную конвекцию. Система уравнений (1.1-1.8) дополняется краевыми условиями. Следует отметить,

что представленная модель турбулентности не всегда оправдана. Для некоторых видов течения она может существенно упрощаться до алгебраической.

1.1. Выбор модели турбулентности

При больших скоростях наполнения объемов (ковшей, изложниц), а также перепадах температур, движение расплава нарушается и приобретает нестационарный пульсационный характер. Численно этот процесс может быть описан уравнением Навье-Стокса. Но поскольку многие важные свойства турбулентных течений характеризуются очень малыми линейными масштабами, любые методы численного решения уравнения Навье-Стокса будут требовать чрезмерных затрат машинного времени и объемов памяти [13].

Невозможность применения аналитических методов при описании турбулентного движения жидкости оправдывает использование численных методов, построенных на основании полуэмпирических теорий замыкания. Однако можно выделить несколько основных причин, затрудняющих использование численных методов при расчете турбулентности:

1. чрезмерно большие затраты машинного времени и памяти при расчете уравнений движения;
2. трудности и неопределенности, связанные с численной интерпретацией граничных условий;
3. отсутствие достаточно точных и универсальных методов описания турбулентного переноса [14,15].

При численном расчете возможно построение нескольких моделей турбулентности:

- модель длины смешения Прандтля, в которой турбулентность выражена в виде некоторых полуэмпирических зависимостей [16,17];
- k - ε – модель, получившая особую распространенность при расчете как отрывных, так и безотрывных течений и основанная на использовании дополнительных уравнений, описывающих перенос турбулентной кинетической энергии (k) и скорости ее диссипации (ε) [18- 24].

В работе [16] авторы используют полуэмпирическую формулу при исследовании сифонного наполнения изложницы. Причем турбулентный аналог числа Рейнольдса (Re_t) определяется как:

$$Re_t = URe_t^* \nu, \text{ где } Re_t^* = \lg[Re(r/L)] \quad (1.9)$$

Авторы оставляют открытым вопрос о предельном значении Re_t .

В работе [25] эта формула была апробирована на модели, позволяющей изучить аэродинамику и теплофизику в воздухе при наполнении ковша чугуном. Полученная картина вихревой структуры удовлетворительно совпадает с промышленным экспериментом, проведенном на МК Азовсталь (рис.1.1).

Однако, если турбулентный перенос значителен во всех направлениях, то предложенная модель недостаточно отражает физику процесса [26].

В работе [17] используется модель длины смешения Прандтля, в которой турбулентная вязкость выражена в виде следующей зависимости от завихренности и масштаба длины:

$$v_t = \chi^2 y^2 |\omega|; \quad (1.10)$$

где χ – постоянная Кармана, считающаяся, в настоящем исследовании, равной 0,41, а y – расстояние, отсчитываемое от стенки.

Несмотря на простоту модели, в результате ее применения в нескольких задачах о внутренних и внешних безотрывных течениях были получены вполне удовлетворительные результаты.

Но с помощью такой модели не всегда удается правильно описать очень важные турбулентные процессы, такие как диссипация [13].

В работе [8] также применялась эмпирическая формула (1.10). Результаты, полученные в ходе расчетов и лабораторных исследований, хорошо совпадают.

Экономически эффективен подход к решению задачи о турбулентных течениях, который заключается в решении осредненных по времени уравнений Рейнольдса. Однако процедура осреднения по времени приводит к появлению в уравнениях неизвестных членов – напряжений Рейнольдса. В последние годы для решения таких уравнений широкое распространение получила k - ε модель с двумя уравнениями переноса [18]. Выполняя сопоставление нескольких моделей турбулентности, авторы пришли к заключению, что данная модель должна приводить к более хорошим результатам расчета по сравнению с другими моделями. Турбулентная вязкость определяется как

$$v_t = C_\mu k^2 / \varepsilon; \quad (1.11)$$

$$\text{где } k = 0,5 \overline{u'u'}; \quad \varepsilon = \nu \left(\frac{\partial u'}{\partial x} \frac{\partial u'}{\partial x} \right) \quad (1.12)$$

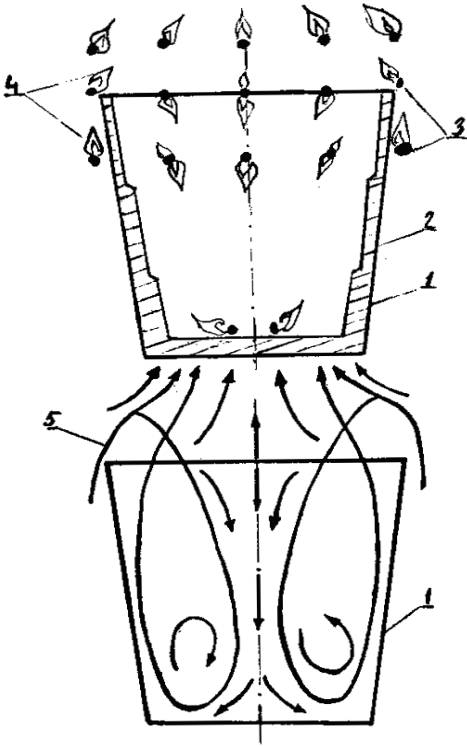


Рис. 1.1. Вихревая архитектура в подогретом перед разливкой ковше, (верхний рисунок – движение воздуха в полости ковша, полученное методом задымления и фотографирования; нижний рисунок – расчетные данные)

Система уравнений для таких моделей состоит из пяти неизвестных u , v , p , u'^2 , v'^2 и с учетом предположения изотропности ($u' = v'$) записывается в виде [22].

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \nu \nabla u, \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \nu \nabla v; \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial uk}{\partial x} + \frac{\partial kv}{\partial y} = +\nabla \frac{\nu}{\sigma_k} \nabla k + \Phi - \varepsilon; \quad (1.15)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial u\varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} = +\nabla \frac{\nu}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon + C_1 \frac{\varepsilon G}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1.16)$$

где $\nu = \nu_l + \nu_t$ – ламинарная и турбулентная вязкости соответственно. ν_t в свою очередь, определяется по формуле (6.11)

$$G = \nu_t \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] - \text{диссипативная функция.}$$

Рейнольдсовы напряжения линейно связаны со средней скоростью деформации через скалярную турбулентную вязкость [19].

$$\bar{v}'^2 = 2\nu_t \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{2}{3} k; \quad \bar{u}'^2 = 2\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \frac{2}{3} k; \quad \bar{v}'\bar{u}' = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \frac{2}{3} k.$$

Наибольшую сложность представляет выбор эмпирических констант. В работах [19,20] показаны k - ε модели, которые отличаются выбором этих констант и диапазоном их применения. Для плоского течения:

$$C_{\mu} = 0,09; C_1 = 1,43; C_2 = 1,92; \sigma_k = 1, \sigma_{\varepsilon} = 1,13. \quad (1.17)$$

Для осесимметричного:

$$C_{\mu} = 0,09 - 0.04 f; \quad C_2 = 1,92 - 0.0667 f;$$

$$f = \left| \frac{\sigma}{\Delta u} \left(\frac{dU_0}{dx} - \left| \frac{dU_0}{dx} \right| \right) \right|;$$

σ -толщина слоя смещения dU – характерное изменение скорости поперек слоя; U_0 – средняя скорость потока вдоль оси.

Однако при расчете слабых сдвиговых течений предполагают C_{μ} функцией G/ε , где G – член характеризующий генерацию энергии [27,28] и тогда:

$$C_{\mu} = 0,09G \frac{\bar{G}}{\varepsilon};$$

Для осесимметричного течения:

$$C_{\mu} = 0,09G \frac{\bar{G}}{\varepsilon} - 0,0543f; \quad C_2 = 1,92 - 0.0667 f;$$

В работах [29, 30] рассматриваются 2 k- ε модели (для течений с малыми и большими числами Рейнольдса) и 5 алгебраических моделей для расчета с высокими числами Рейнольдса. Все эти модели сформулированы для развитых турбулентных течений в трубах, однако методы их решения вполне пригодны для расчета турбулентных течений в ограниченных объемах. Авторы показали, что ни одна алгебраическая модель хорошо не работает у стенки. Это объясняется отсутствием слагаемых, учитывающих влияние стенки. Напротив, k- ε модель наилучшим образом согласуется с экспериментом.

Вообще численная реализация граничных условий в случае турбулентных течений весьма затруднительна из-за больших градиентов турбулентных характеристик у стенки. Турбулентный погранслой вблизи стенки состоит из очень узкого вязкого подслоя, инерционного слоя и внешней области течения. Профиль скорости представляет собой линейную зависимость в вязком подслое, логарифмическую в инерционном слое и быстро меняющуюся функцию во внешней области. Для подробного описания течения в вязком подслое необходим чрезвычайно малый шаг сетки, что нереально с точки зрения ресурсов памяти и быстродействия современных ЭВМ. Поэтому одним из способов задания граничных условий является закон "стенки" [18].

В работе [19] для описания поведения течения на стенке, учитывались эффекты неізотропной диссипации (значения диссипации задаются на стенке нулевыми). Причем, последнее учитывается через молекулярную вязкость, входящую в диффузионные члены во всех уравнениях переноса. Рекомендуемая в [19] модификация модели заключается во включении члена уничтожения в k-уравнение:

$$-2\nu \left[\left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \right]; \quad (1.18)$$

и члена порождения в ε – уравнение:

$$2v_t \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)^2 \right]; \quad (1.19)$$

C_μ замещается на $C_\mu [-2,5(1+Re_t/50)]$ и C_2 на $C_2 [1-0,3\exp(-Re_t^2)]$. Значения k и ε полагаются нулевыми на стенках.

В работе [31] авторы моделируют турбулентную полуограниченную струю с помощью k - ε модели, но указывают, что модель работает для развитого течения и применима вблизи стенки. Авторы считают, что у стенки имеет место течение Куэтта и выполняются условия:

$$\frac{\partial k}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = 0;$$

На границе течения Куэтта турбулентная кинетическая энергия и скорость ее диссипации определяются как:

$$k = \frac{\tau_*}{\sqrt{C_\mu}}; \quad \varepsilon = \frac{\tau_*^{3/4}}{\chi},$$

где τ_* – касательное напряжение, χ – постоянная Кармана.

Касательное напряжение предлагается определять из уравнения:

$$\frac{\partial \tau_* u}{\partial x} + \frac{\partial \tau_* v}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{\sigma_\tau} \frac{\partial \tau_*}{\partial y} \right) + C_\tau C_\mu \tau_* \frac{\partial \pi}{\partial y} - C_\tau \tau_* \frac{\varepsilon}{k}.$$

Все эти работы в основном касаются методов исследования турбулентности в трубах или при обтекании профилей. Однако в работах [32-36] эти модели и методы их реализации с успехом применялись при исследовании гидродинамики, тепломассопереноса в ограниченных объемах, в частности при разливке в ковш или изложницу.

В работе [32] дан обзор результатов исследования свободной конвекции в замкнутых полостях с архимедовой силой, вызванной распределенным объемным источником энергии. Рассматривались полости с адиабатическими стенками, а также с охлаждением сверху. Авторы утверждают, что при больших числах Рэлея (Ra), когда явно невозможно определить аналитически структуру течения или теплообмен, единственным средством являются численные методы.

Фарук В. [33] исследовал турбулентную тепловую конвекцию в замкнутой полости с внутренним тепловыделением. Автор утверждает, что необходимо рассматривать всю область течения, т.к. с ростом Ra картина течения изменяется от симметричной многоячейстой структуры к несимметричной одноячейстой. Автор проиллюстрировал зависимость турбулентной вязкости от числа Ra . Осредненные по времени результаты для функции тока, изотерм и турбулентной вязкости показаны на рис.1.1. При $Ra=10^6$ уровень турбулентности в области относительно низок и турбулентная вязкость лишь в 3 раза больше молекулярной (рис.1.2,а, б, в). При увеличении числа Ra до 10^7 погра-

нический слой у верхней поверхности уменьшается, турбулентная вязкость возрастает на порядок (рис.1.2, г, д, е).

При больших Ra симметрия в картине течения исчезает, тонкий тепловой слой указывает на высокую степень теплообмена. При $Ra=10^9$ многоячеистость сменяется одноячеистой картиной.

В работе [34] авторы проводят численные исследования при рафинировании стали в ковше, при этом к вышеупомянутой системе уравнений гидродинамики тепломассопереноса и модели турбулентности добавляется уравнение диффузии. Авторы показали, что турбулентные пульсации скорости первоначально возникают в центре ковша, постепенно охватывая весь объем, при этом эффективный коэффициент вязкости увеличивается на 4 порядка по сравнению с коэффициентом молекулярной вязкости. Это подтверждается в ряде работ Дж. Зекели [8, 9, 36, 37]. Автор исследовал не только $k-\epsilon$ модель, но и предложил формулу, позволяющую описать турбулентную вязкость [8, 9].

Экспериментальные и теоретические исследования показали, что нижняя часть ковша остается относительно невозмущенной.

Р.И.Л.Гутри [37] сравнил результаты расчетов, полученных на основании турбулентной и ламинарной моделей при наполнении ковша (рис.1.3). Струя металла диаметром 0,2 м сливается в ковш диаметром 3,4 м со скоростью 10м/с. Как видно, турбулентная струя значительно быстрее гасится в толще металла, чем ламинарная.

Картина распределения турбулентной вязкости (рис.1.4) указывает на то, что значение ν вблизи контакта внедряющейся струи с циркулирующим потоком стали в 10^4 раз больше, чем ламинарной.

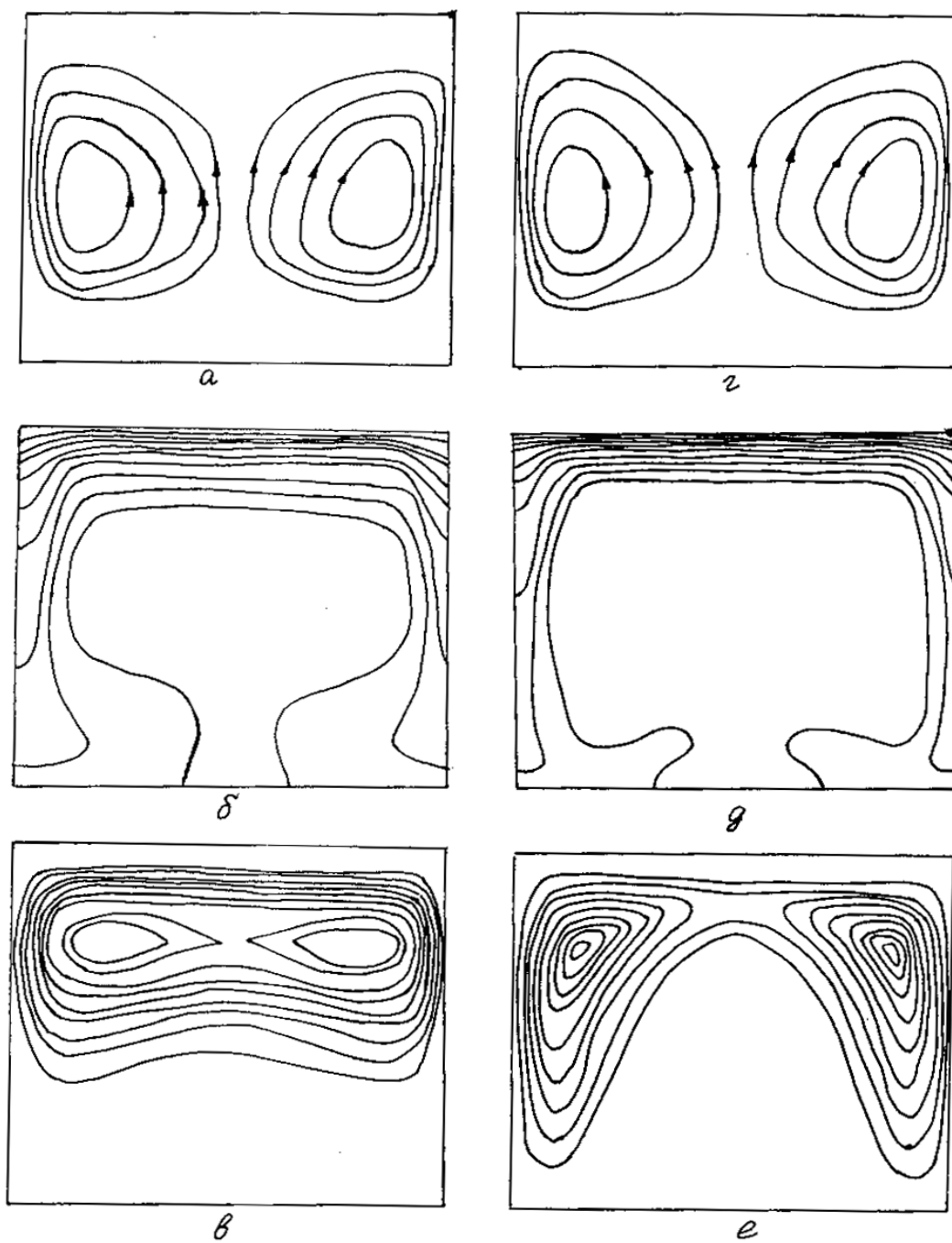


Рис. 1.2. Линии тока (а, г), изотермы (б, д) изолинии вязкости μ_t (в, е) при $Ra\ 10^6, 10^7$ соответственно

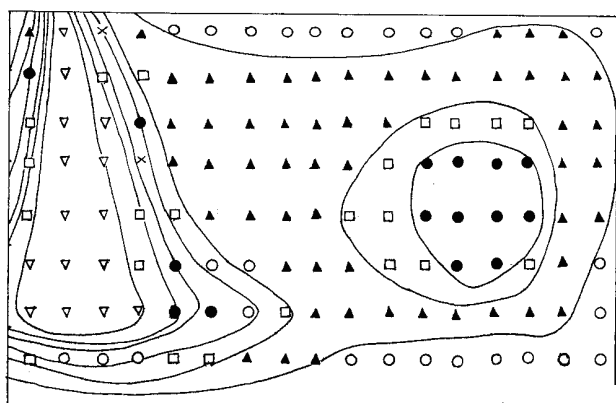


Рис. 1.3. Картина пространственного распределения величины турбулентной вязкости (μ_t) при сливе стали в ковш глубиной 1,6 м.

Обзор литературы по вопросу турбулентного теплопереноса в жидкости и газе показал, что проведенные на основе k-ε-модели исследования дают результаты хорошо совпадающие с реальными [40,41].

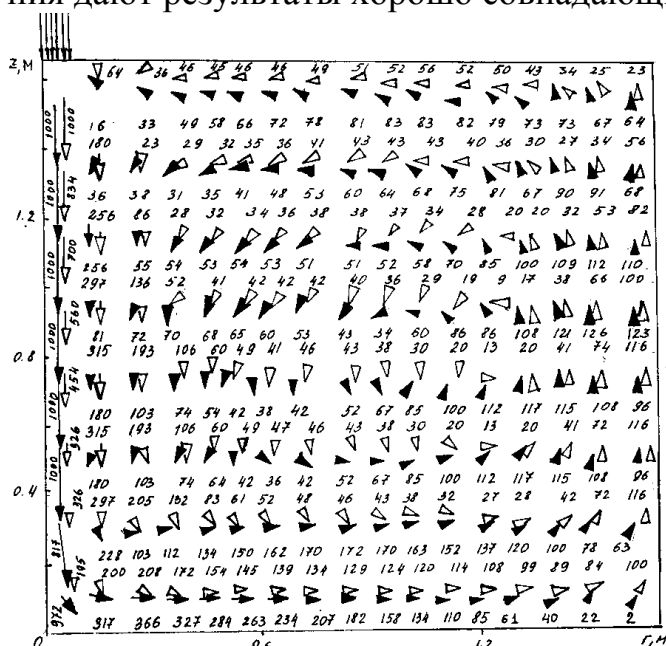


Рис. 1.4. Сопоставление рассчитанных на основе турбулентной и ламинарной моделей полей скорости потоков жидкой стали в ковше глубиной 1,6 м и радиусом 1,65 м. Стрелки (\triangle — для турбулентной и \blacktriangleright — для ламинарной моделей) указывают направление скорости, цифры – величину скорости (см/с)

Данные, полученные на основании использования алгебраических моделей при решении многих задач, также адекватны промышленным процессам [8, 9, 39]. Однако, в литературе практически отсутствуют комплексные исследования по вопросу турбулентного теплопереноса как в период разлива, так и затвердевания слитка. Поэтому целесообразно провести исследования гидродинамики и теплопереноса при заливке и затвердевании стальных изделий.

1.2. Выбор моделей турбулентности для расчета теплофизических и гидродинамических процессов в затвердевающем слитке

Конвективное движение в заливаемом в изложницу расплаве определяется двумя процессами: конвективным теплопереносом вследствие осредненного движения среды и за счет турбулентности. Поэтому математическая модель должна правильно описывать не только поле средних скоростей, но и характеристики турбулентных течений.

Система точных уравнений, описывающая во времени все детали эволюции полей скорости, температуры и концентрации в металлургической задаче, не может быть решена с помощью современных вычислительных средств [40].

В настоящее время существует единственный экономически оправданный выход: решать уравнения осредненного движения, которыми определяется распределение осредненных по времени величин. Причем время осред-

нения должно быть много больше временного масштаба турбулентности, но много меньше временного масштаба осредненного течения.

Такие уравнения содержат члены турбулентного переноса, которые должны быть аппроксимированы определенной моделью турбулентности для решения этой системы. Возникает вопрос, какой же должна быть сложности модель для получения результатов с достаточной для практической цели точностью.

Некоторые задачи удовлетворительно решаются с помощью алгебраической модели. Другие – с привлечением довольно сложных схем турбулентности различного порядка. В идеальном случае модель турбулентности должна быть настолько общей, чтобы для ряда прикладных задач ее можно было бы применять без изменения. Выбор схемы решения турбулентности – цель данного параграфа.

Для оценки применимости модели турбулентности предлагается тестовая система осредненных стационарных уравнений:

$$\frac{\partial \omega u}{\partial x} + \frac{\partial \omega v}{\partial y} = \nabla [\text{Pr}(1 + \nu_t) \nabla \omega] + \text{PrRa} \frac{\partial \theta}{\partial x}; \quad (1.20)$$

$$\varpi = -\Delta \psi; \quad (1.21)$$

Численный расчет осуществлялся для прямоугольной области, на неравномерной сетке размерностью 60×50 (граничные условия будут оговорены ниже при рассмотрении конкретной задачи). В основе численной реализации лежит метод переменных направлений.

Рассмотрим несколько наиболее популярных моделей турбулентности и оценим их работоспособность для следующих видов течения расплавленного металла:

Естественная конвекция. Уравнения (1.20) – (1.21) дополняются следующими граничными условиями: для скорости – условия прилипания на всех границах; для температуры – на правой стенке $\theta = \theta_{\text{ср}}$ ($\theta_{\text{ср}}$ - температура окружающей среды), на всех других границах выполняется условие адиабатичности.

Вынужденная конвекция, описывается уравнениями (1.20) – (1.21), с граничными условиями на верхней границе:

$$\psi|_{\Gamma} = V_m x; \quad \omega|_{\Gamma} = \frac{2}{y^2} (\psi|_{\Gamma-1} - V_m x); \quad x = [0, R]; \quad (1.22)$$

где V_m – скорость поступления расплава в объем – 2м/с; R – радиус струи; Γ – верхняя граница полости.

Смешанная конвекция, для которой выполняются гидродинамическое условие (1.22) и тепловые ($\theta|_{\Gamma} = \theta_0$, $x = [0, R]$) на верхней границе.

Для всех перечисленных видов течения жидкой стали $\text{Pr}=0,216$, $\text{Ra}=10^9$.

Рассмотрим модель Прандтля. Успех этой модели объясняется тем, что для многих простых случаев ν_t задается формулой:

$$v_t = l^2 \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|, \quad (1.23)$$

где l – длина пути смешения, которую можно трактовать, как расстояние в поперечном направлении, на котором частица сохраняет свой собственный импульс и зависит от типа течения [28]. Величину $l \left| \frac{\partial u}{\partial y} \right|$ – трактуют как характерную скорость турбулентности V_t .

Видно (рис.1.5, а, кривая 1), что значение v_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 предыстории развития процесса. Т.е. в модели Прандтля пренебрегается турбулентный перенос импульса в направлении от стенок к оси области.

Для второго вида течения (рис.1.5, б, кривая 1) возрастание турбулентной вязкости наблюдается вблизи струи, где имеет место наибольший градиент скорости. Распределение турбулентной вязкости для третьего вида течения представлено на рис.1.5, в, кривая 1. Возникновение промежуточного минимума на кривой v_t , по нашему мнению, противоречит физике процесса порождения турбулентности. Дело в том, что в этой части области значения полей 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 (1.23) и приводит к противоречивому результату.

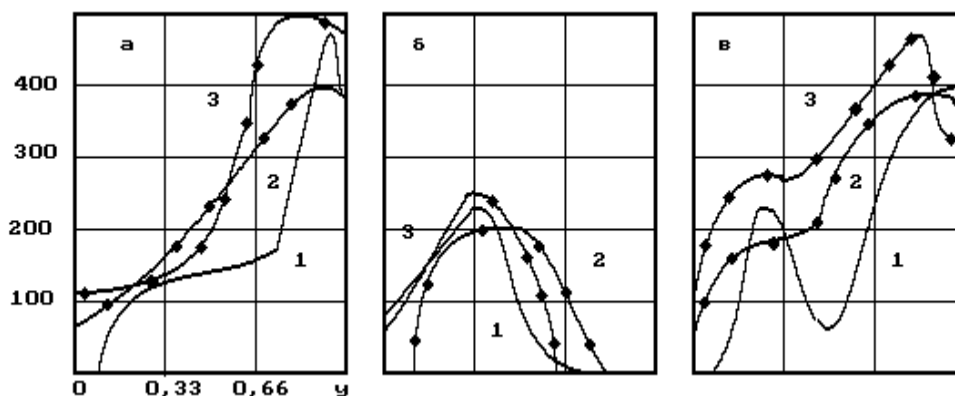


Рис.1.5. Распределение турбулентной вязкости по горизонтальному сечению области: а – при естественной конвекции; б – при вынужденной; в – при смешанной; 1 – прандтлевская модель расчета турбулентности; 2 – k – модель; 3 – $k - \epsilon$ – модель

Во избежание этого недостатка была предложена однопараметрическая модель [41], основанная на решении уравнения кинетической энергии турбулентности $k=0.5 \overline{u'u'}$, квадрат которой пропорционален скорости турбулентности V_t . Используя уравнение переноса для k

$$\frac{\partial u k}{\partial x} + \frac{\partial k v}{\partial y} = \nabla \left(1 + \frac{v}{\sigma_k} \right) \nabla k + \Phi - \varepsilon; \quad (1.24)$$

$$\text{турбулентность можно оценить как } \nu_t = C_k l \sqrt{k} \quad (1.25)$$

Понятно, что в соответствии со второй моделью устраняется недостаток модели пути смешения, связанный со стремлением значений ν_t к нулю, когда $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$. 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 k малы. Поэтому диссипация и генерация уравновешивают друг друга, и задача кинетической теории турбулентности сводится при этих условиях к модели длины смешения [43-46]. Поэтому в пристеночной области в качестве внутреннего граничного условия для k можно использовать:

$$k(x_0) = l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) / C_d^{2/3}. \quad (1.26)$$

Таким образом, основу однопараметрической модели турбулентности составляет система уравнений (1.19) – (1.22), (1.24) и соотношение (1.25) – (1.26). Представленные на рис. 1.5, 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 $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$.

Но недостатком этой модели является независимость длины пути смешения 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 смешения. Поэтому предложена двухпараметрическая модель (k - ε) [18]. Параметр скорости диссипации турбулентной энергии ε связан с другими модельными параметрами соотношением:

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

и находится из уравнения переноса:

$$\frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} = \text{Pr} \left[\nabla \left(1 + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \text{PrG} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1.27)$$

где $C_1, C_2, \sigma_\varepsilon$ – константы турбулентности.

Тогда формула для расчета турбулентной вязкости записывается в виде (1.11).

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. Авторами [18,19] 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:

$$k_{|\Gamma} = 1,5TuV_m^2; \quad \varepsilon_{|\Gamma} = C_\mu^{3/4} k^{3/2} / l; \quad [0,R]. \quad (1.28)$$

Т.о. двухпараметрическая модель турбулентности состоит из уравнений (1.19)-(1.21), (1.24), (1.27), (1.11) и условий (1.28).

Сопоставление результатов ВЭ, выполненных на основе одно-и двухпараметрической модели турбулентности, свидетельствует об их удовлетворительном согласовании (рис.1.5,а,б,в, кривые 2 и 3). Однако, учитывая громоздкость k - ε 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.

Исследования применимости и работоспособности двухпараметрической модели турбулентности выполнены на примере решения нестационарной задачи тепловой конвекции турбулентности в области с отношением сторон $L_2/L_1 = 0,5$. На верхней стенке $\theta = 0$, на всех остальных границах задается условие адиабатичности. Исследования проведены для $Ra = 10^8 - 10^{10}$. Турбулентные процессы переноса импульса и тепла, происходящие в области при естественном конвективном перемешивании, описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} + \nabla \nu \nabla \vec{V} + \beta \bar{g} \nabla T;$$

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

$$c\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) T \right] = \nabla \lambda \nabla T;$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) k = -\frac{1}{\rho} + \nabla \nu \nabla k + G - \bar{g} \beta \Delta T - \varepsilon;$$

$$\frac{\partial u \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial v \varepsilon}{\partial y} = \text{Pr} \left[\nabla \left(1 + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \text{Pr} G - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}.$$

Для значения числа $Ra=10^8$ тепловая конвекция достигает режима стабилизации при $Fo=0,001$. Картина течения симметрична с развитым градиентом температур и высокими значениями v_t и k в верхней части области (рис.1.6). В нижней части области (рис.1.6) преобладает ламинарное течение. По мере увеличения числа Ra увеличивается период достижения режима стабилизации конвекции, усиливается турбулизация и в конечном итоге ($Ra=10^{10}$) структура течения становится мелковихревой и асимметричной с довольно тонким тепловым погранслоем в верхней части области.

Таким образом, при моделировании процесса наполнения сложных литейных форм наиболее приемлемой является k - ε модель. Однако учитывая громоздкость и значительные затраты машинного времени при ее численной реализации, для инженерных расчетов прикладных задач в областях несложной конфигурации (прямоугольная, цилиндрическая) следует отдать предпочтение однопараметрической модели турбулентности. ВЭ установлены геометрические размеры области, для которых следует выбирать математическую модель процесса наполнения в турбулентной или ламинарной постановке.

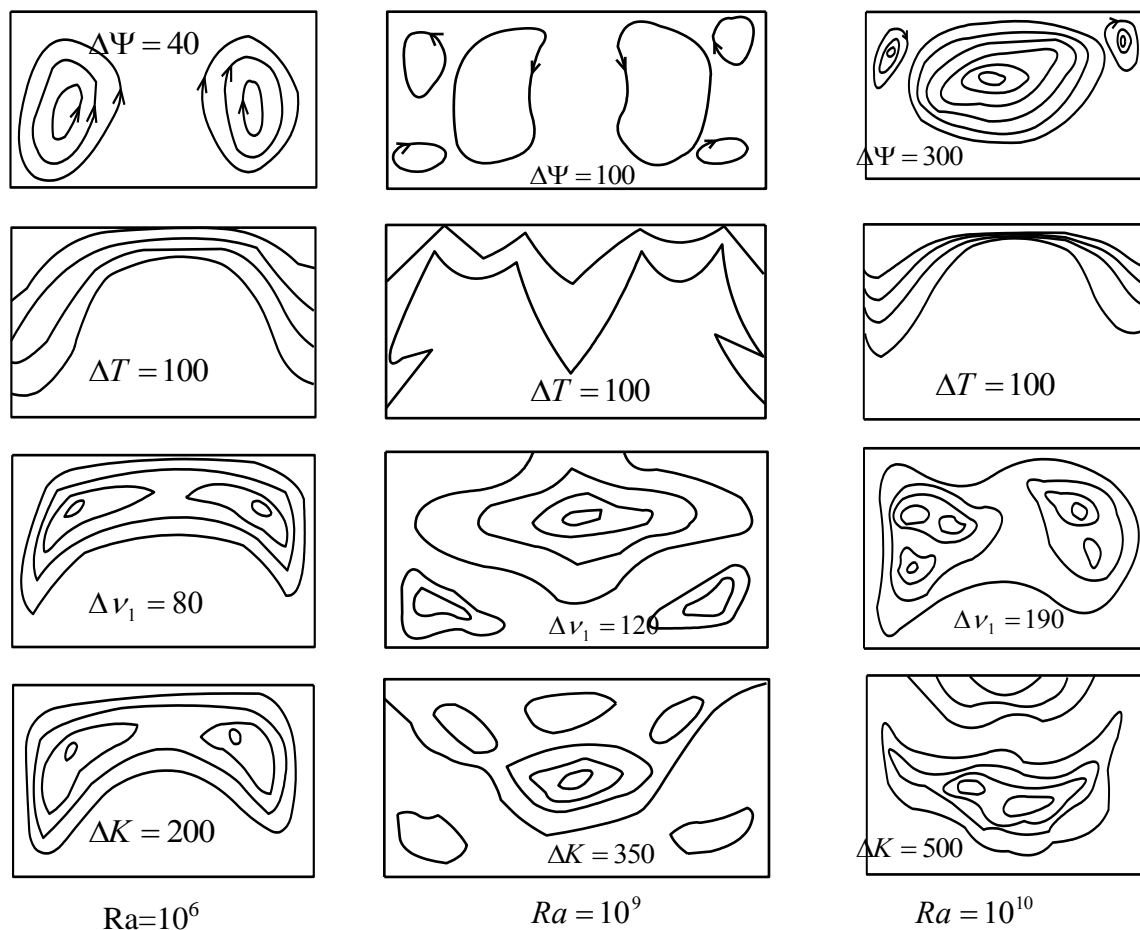


Рис.1.6. Линии функции тока, изотермы, линии турбулентной вязкости, турбулентной кинетической энергии при различных числах Релея

Приведенный выше набор схем известен и в той или иной мере используется в вычислительной практике. В каждом случае необходимо знать диапазон и условие применимости данной схемы. Ряд работ посвящен тестиро-

ванию конечно-разностных схем [47,48], однако расчеты нелинейных задач конвекции методами конечных разностей освящены все еще недостаточно. Поэтому выполним тестовые расчеты некоторых классических задач с помощью выбранной и описанной схеме возмущенного оператора с разностью против потока. На рис.1.7. показаны результаты расчета тепловой гравитационной конвекции в замкнутой квадратной области при подогреве области сбоку. Система уравнений (1.1)-(1.3) замыкается следующими граничными условиями:

$y=0$	$0 \leq x \leq 1$	$\psi=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$	$\frac{\partial \theta}{\partial y} = 0$
$y=1$	$0 \leq x \leq 1$	$\psi=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial y} = 0$	$\theta = 1$
$x=0$	$0 \leq y \leq 1$	$\psi=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$	$\theta = 1$
$x=1$	$0 \leq y \leq 1$	$\psi=0$	$\frac{\partial \psi}{\partial x} = 0$	$\theta = 0$

Расчет осуществлялся на равномерной сетке 65*65 при $Gr = 1,25 \cdot 10^4$, $Pr = 0,71$. Физическая картина течения в такой области, рассчитана численно и подробно описана в работе [48]. На рис 1.6 видно, что в области образуется циркуляционное течение, перемешивающее жидкость и переносящее тепло от нагретой стенки к холодной. Качественно полученная картина совпадает с результатами численного моделирования авторами [49]. Увеличения числа Грасгофа до 10^5 приводит к появлению вторичных внутренних течений в ядре (рис.1.6,б).

1.3. Выбор границ применимости математической модели турбулентности при формировании стального слитка

Гидродинамические процессы определяют тепловую и физико-химическую обстановку в затвердевающем стальном слитке. Расчет полей скорости трудоемкая задача, требующая значительных затрат машинного времени. Так расчет полей скорости в жидком ядре кристаллизующегося расплава занимает до 60% машинного времени, остальные 40% приходятся на определение полей температуры, концентрации и доли твердой фазы. Если процесс носит турбулентный характер, то затраты на расчет гидродинамической части задачи составляют 62-80% машинного времени в зависимости от выбранной модели турбулентности. Поэтому выбор математической модели – сложный процесс: с одной стороны, пренебрежение турбулентным переносом субстанций может привести к существенному искажению результатов, а с другой стороны, необоснованный учет турбулентности существенно увеличивает время расчета на ЭВМ.

Целью данного параграфа, является определение рациональных границ применимости турбулентной модели переноса импульса и тепла в затверде-

вающем расплаве в замкнутой области, т.к. именно для замкнутых областей этот вопрос до настоящего времени остается открытым.

В качестве метода исследования выбрано математическое моделирование гидродинамических процессов, тепло и массопереноса с привлечением $k-\varepsilon$ -модели турбулентности при разливке и затвердевании стального слитка [53-58].

Исследования проводились для двух этапов формирования слитка: первый-разливка в изложницу, второй-затвердевание. Для первого этапа имеет место альтернатива – либо считать гидродинамику в ламинарном приближении, либо – в турбулентном. На рис.1.7 представлена зависимость средней по высоте слитка толщины твердой корочки от тоннажа слитка при разливке сверху и сифоном (снизу). Оценка влияния способа разливки на поведение расплава осуществлялась при одинаковых технологических параметрах (теплогерегреве и скорости поступления расплава в изложницу) как при разливке сверху, так и при сифонной.

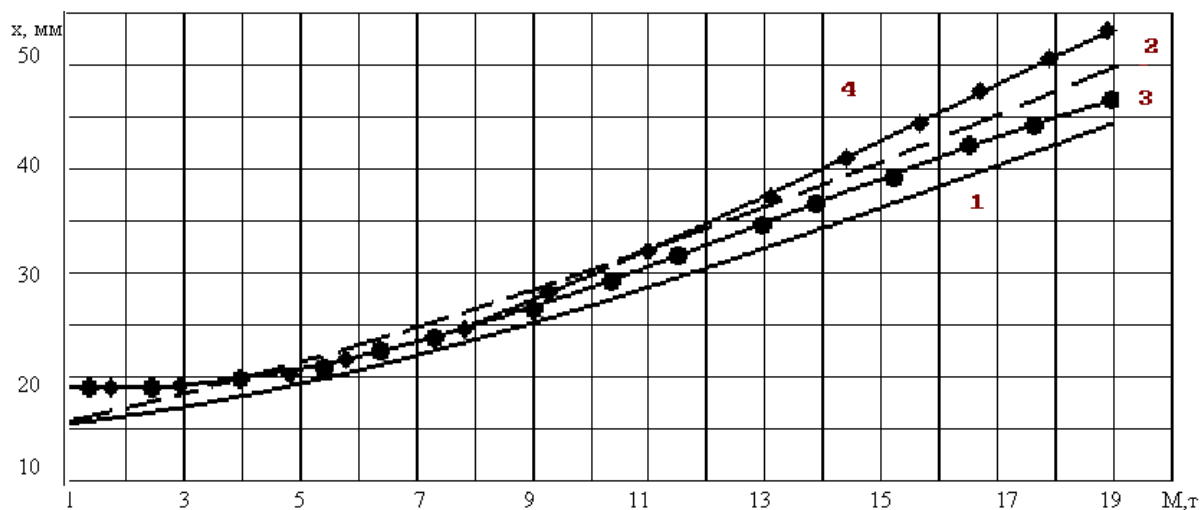


Рис. 1.7. Зависимость средней толщины твердой корочки от тоннажа слитка при разливке сверху: кривая 1- без учета турбулентности, 2 – с учетом турбулентности; при разливке снизу: 3- без учета турбулентности, 4 – с учетом турбулентности

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.1.7).

Различие в поведении расплава в зависимости от способа разливки объясняется следующим образом. В период разливки интенсивность перемешивания расплава характеризуется двумя причинами: механическим воздействием струи и тепловой конвекцией. Эти две причины обуславливают развитие в расплаве смешанной конвекции, которая определяет гидродинамическую обстановку в расплаве, и, как следствие, тепло- и массоперенос. При разливке сверху имеют место две зоны. Первая существует на протяжении всего процесса разливки и характеризуется наличием нисходящих потоков в центре изложницы, вызванных раскрытием струи. По мере наполнения изложницы (50%), образуется вторая зона, в которой наблюдается обратное те-

чение, т.е. в центре внизу имеют место восходящие потоки, а в пристеночной области по всей высоте изложницы – нисходящие [55]. Эта зона обусловлена, в первую очередь, тепловым градиентом. Интенсивность перемешивания во второй зоне на порядок ниже, чем в первой. С наполнением области размеры первой зоны не изменяются, а вторая зона занимает все больший объем.

Влияние турбулентной вязкости существенно сказывается на толщину "твердой корочки" по высоте слитка. Препятствуя распространению струи вглубь расплава [56], она способствует раннему образованию второй более спокойной зоны. Если на верхних горизонтах потоки, вызванные струей, отдают тепло, подплавляя "твердую корочку", то на нижних горизонтах нисходящие потоки отбирают у пристеночных слоев тепло и выносят его в центр слитка, способствуя росту "твердой корочки".

При разливке сифоном, наблюдается три зоны течения: центральная, представляющая собой восходящие циркуляционные потоки, обусловленные раскрытием струи; периферийная – нисходящие потоки, вызванные эжектирующим действием струи и тепловой конвекцией; зона восходящих потоков, локализованных в верхнем углу, образованная уровнем расплава и боковой стенкой. Как и при разливке сверху, в первой зоне имеют место наибольшие значения скорости (до 60 см/с при расходе 1000 кг/мин). Однако, если при разливке сверху эта зона перемещается по мере наполнения изложницы, то при сифонной разливке она неподвижна. Высота факела струи не превышает 70-100 см, влияние турбулентной вязкости практически не сказывается на его высоту.

Вторая зона более спокойна (максимальная скорость достигает 20 см/с) и локализуется в донной части изложницы. В начале наполнения перемешивание расплава вызвано эжекцией струи. С нарушением теплового равновесия в расплаве интенсивность смешанной конвекции увеличивается за счет конвективного теплопереноса. Следует отметить, что влияние турбулентности больше сказывается во второй зоне. Это выражается в более интенсивном росте "твердой корочки". По-видимому, восходящие потоки, отдавая тепло на высоте 1 – 1,2 метра, охлажденными опускаются ко дну изложницы, способствуя наращиванию "твердой корочки". Понятно, что при турбулентном теплопереносе процесс отдачи тепла происходит интенсивнее.

Третья зона наиболее спокойная (максимальная скорость 1,5-2 см/сек), здесь не проявляется активность струи, а равномерно распределенная температура по сечению слитка не способствует образованию тепловой конвекции. Эта зона образуется после 50% наполнения изложницы, поэтому твердая корочка наиболее тонкая. Влияние турбулентности практически не сказывается.

При увеличении размеров изложницы (наибольшее влияние на протекание процессов оказывает ширина изложницы) наблюдается увеличение второй зоны и толщины "твердой корочки".

На примере двух видов разливки показано, что величина турбулентной вязкости вносит существенные коррективы в тепловую и гидродинамическую обстановку. 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 $Re = Vd/\nu$, $Gr^* = g\beta\Delta T x_{пр}^3/\nu^3$, V – скорость поступления металла в изложницу, $d_{пр}$ – диаметр струи у зеркала металла при разливке сверху или в стакане при разливке снизу, $\Delta T = T_0 - T_1$ – теплоперегрев, разница между температурой T_0 разливки и T_1 ликвидусом, $x_{пр}$ – приведенный размер слитка (отношение объема слитка к площади его поверхности). Выбор $x_{пр}$ позволяет учесть различные соотношения геометрических размеров слитка [61]:

$$x_{пр} = \frac{S_{слитка} + S_{приб}}{4(V_{слитка} + V_{приб})},$$

где $S_{слитка}$, $S_{приб}$, $V_{слитка}$, $V_{приб}$ – площади и объемы слитка и прибыли соответственно.

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

Второй этап исследования – определение границ применимости турбулентной модели на этапе затвердевания слитка. На этом этапе в связи с прекращением заливки определяющим критерием является число Релея.

Сравнение времен затвердевания 1-тонного слитка, рассчитанного в условиях отсутствия конвекции и при естественном перемешивании расплава, показали, что влиянием гидродинамики в вертикальном слитке можно пренебречь при $Ra^* < 1,5 \cdot 10^6$. Но для таких чисел Ra^* ($Pr=0,216$ и $x_{пр}=0,095$ м) перегрев не должен превышать $1^\circ C$, что технологически нереально при разливке слитка. Поэтому можно утверждать, что при затвердевании стальных слитков массой более одной тонны необходимо учитывать конвекцию.

Что касается учета турбулентности, то для оценки ее влияния просчитаны 12 вариантов затвердевания блюминговых слитков весом 2,7; 5,75; 10; 12; 18; 20; 24; 42; 98; 120; 380 и 420 тонн при перегреве $\Delta T=60^\circ C$. Различия полного времени затвердевания слитка, превышающее 10%, уже начинается с 20-тонного слитка с $x_{пр} = 0,3$ м и $Ra^* = 5,1 \cdot 10^8$. Для 420 тонного слитка ($x_{пр}=0,83$ м, $Ra^*=1,1 \cdot 10^{10}$) эти различия составляют 19%. На основании расчетов была построена диаграмма, позволяющая выбрать соответствующую математическую модель в зависимости от $x_{пр}$ и ΔT (рис. 1.7).

В процессе расчета одного варианта затвердевания стального слитка, возможно последовательное применение нескольких моделей: турбулентной, ламинарной и бесконвективной. Для 20 – тонного слитка залитого при $\Delta T=60^\circ C$, необходимо применять модель, учитывающую турбулентность, т.к. согласно диаграмме, значение Ra^* находится в области 3, соответствующей турбулентной модели. Через 17,5 минут после начала затвердевания в связи со снятием теплоперегрева [58] значения числа Ra^* позволяют говорить о

возможности применения ламинарной модели, а через 87 минут после начала затвердевания можно отказаться от учета конвекции. Анализ позволил существенно снизить затраты машинного времени. При использовании модели турбулентности на протяжении всего времени затвердевания 20-тонного слитка было затрачено 29 часов машинного времени IBM 286/287, а при комбинированном использовании различных моделей (рис.1.7) – 13 часов. При этом расхождение во времени затвердевания слитков составило 2,3%.

Таким образом, полное время затвердевания слитка t_0 условно представляется в виде:

$$t_0 = t_t + t_l + t_{\delta k} = t_k + t_{\delta k}, \quad (1.29)$$

где t_t – время существования турбулентной конвекции, t_l – ламинарной, t_k – суммарное время существования конвекции в жидком ядре затвердевающего расплава и $t_{\delta k}$ – время бесконвективного затвердевания слитка.

Для определения безразмерного времени применения конвективной модели, обработаны результаты расчетов затвердевания 12 вышеуказанных вариантов. На основании статистической обработки результатов получена следующая формула:

$$Fo_k = 5,39Ra^{*0,15}. \quad (1.30)$$

Например, для для 24 тонного слитка углеродистой стали Ст.0,8 ($x_{пр} = 0,32$ м и $\Delta T = 60^\circ C$) значение числа $Ra^* = 6,1 \cdot 10^8$. Подставляя значение Ra^* в формулу (6.28), получаем $Fo_k = 5,25 \cdot 10^{-1}$. Определим размерное время, при котором рекомендуется учитывать влияние естественной конвекции ($t_k = Fo_k x_{пр} / a$), которое для указанной стали равно 97,1 мин. Дальнейший учет конвекции нецелесообразен, т.к. в силу малых скоростей перемешивания, она не влияет на полное время затвердевания слитка и конфигурацию "твердой корочки" [59].

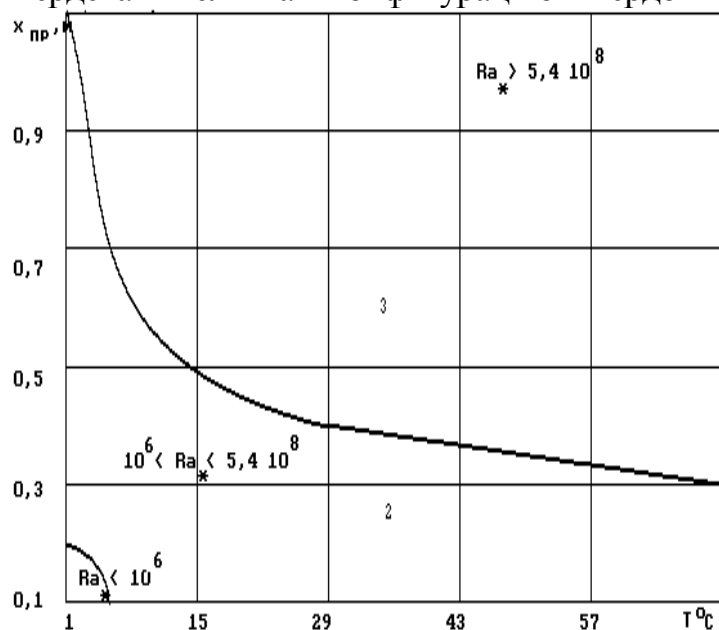


Рис.1.8. Диаграмма выбора математической модели в зависимости от приведенного размера и перегрева: 1 – бесконвективные, 2 – ламинарная конвекция, 3 – турбулентная

Для определения временного интервала существования конвекции в турбулентном режиме проведены исследования для 20, 24, 42, 98, 120, 380 и 420 – тонных слитков при $\Delta T = 60^\circ\text{C}$ и построена зависимость (рис.1.9, пунктирная кривая, для которой значения параметров представлены в скобках по осям абсцисс и ординат),

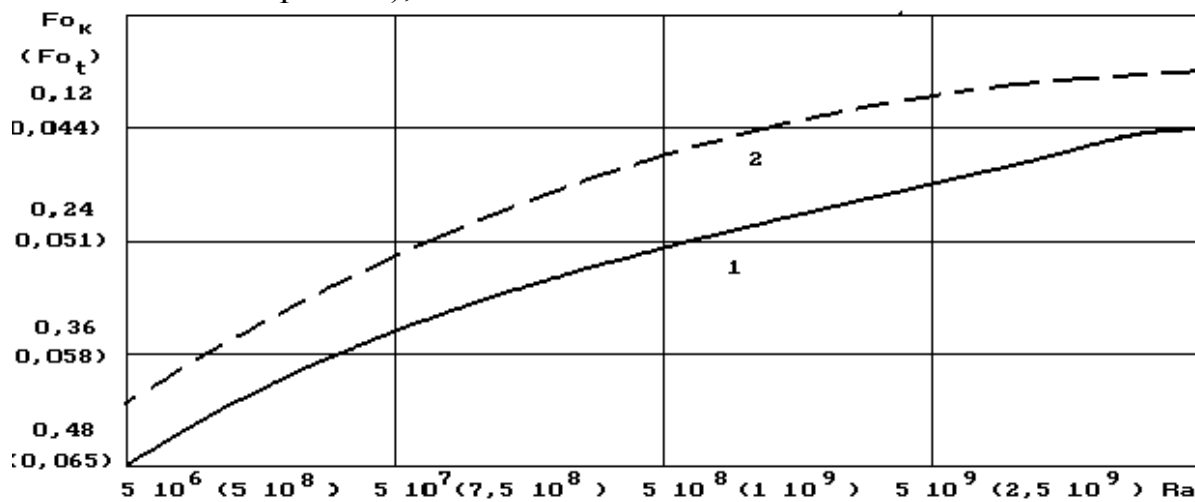


Рис.1.9. Зависимость времени существования конвекции (кривая 1) и турбулентной конвекции (кривая 2, значение параметров для нее представлены в скобках по оси абсцисс и ординат) от числа Ra^*

$$Fo_t = 0,208 Ra^{*-0,068}. \quad (1.31)$$

Вычислительный алгоритм. Система уравнений (1.1-1.9) реализуется в переменных вихрь-функция тока ($\omega-\psi$), что является наиболее эффективным приемом при моделировании процессов переноса в плоской постановке с точки зрения экономии машинных ресурсов.

Строится неявная монотонная конечно-разностная схема с привлечением методов интегро-интерполяционного, «возмущенного» оператора, разности против потока и прогонки [5]. Совокупность всех этих методов сводит нелинейные дифференциальные уравнения к цепочке алгебраических.

Работоспособность разработанной математической модели и вычислительного алгоритма доказана на примере ряда задач по разливке и затвердеванию слитков.

Разливка сверху. В результате вычислительного эксперимента (ВЭ) получено:

учет турбулентности сказывается в уменьшении глубины проникновения струи вглубь расплава (на 60% 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 сказывается в ускорении (на 10%) роста «твердой корочки», особенно в нижней пристеночной области;

учет газозахвата и турбулентности приводят к уменьшению глубины проникновения струи вглубь расплава на 68% при содержании газовой фазы 20% и росту "твердой корочки" в нижней части изложницы на 21% (рис.1.10)

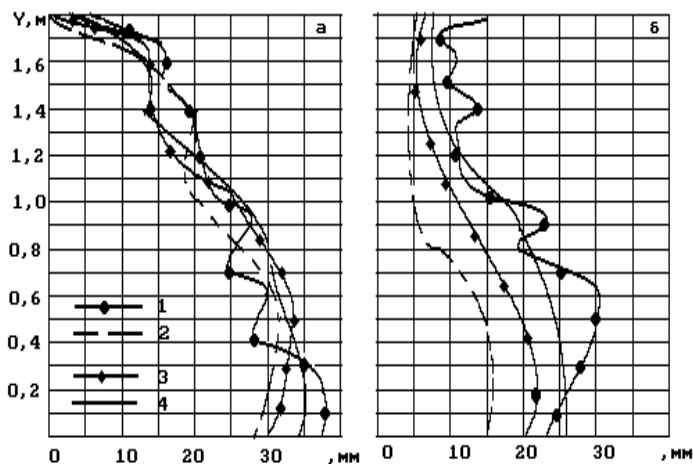


Рис.1.10. Толщина твердой корочки по высоте 15,3 тонного слитка при разливке сифоном (а) и сверху (б) кривая 1 результаты эксперимента, 2 – расчет без учета турбулентности, 3 – с учетом турбулентности, 4 – с учетом турбулентности и газовой фазы

Разливка сифоном:

влияние турбулентности и газовой фазы практически не сказалось на высоте ядра затопленной струи и распределении вертикальной компоненты скорости на оси изложницы, 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%.

Установлено, что учет турбулентности необходим при следующих значениях чисел Релея $Ra^* = ReGr^*$: для разливки сверху – $8,9 \cdot 10^{12}$, а для сифонной – $3,8 \cdot 10^{13}$, где $Gr^* = g\Delta T x_{пр}^3 \beta_T / \nu^2$, $x_{пр}$ - приведенный размер слитка (отношение объема слитка к площади его поверхности). Выбор $x_{пр}$ позволяет учесть различные соотношения геометрических размеров слитка.

Тепломассоперенос при затвердевании стального слитка в условиях турбулентной термоконцентрационной конвекции. Выявлено, что:

1. турбулентные характеристики движения расплава наиболее значительны в первые 4-5 мин, в дальнейшем их величина резко падает;
2. учет конвекции необходим при числах Релея $Ra^* > 1,5 \cdot 10^6$, а турбулентной при числах $Ra^* > 5 \cdot 10^8$.

1.4. Условия на границе

Все описанные выше металлургические процессы описываются ограниченным количеством уравнений, основанных на законах сохранения переноса импульса, энергии, вещества. Многообразие задач объясняется наличием различных условий однозначности: начальными и граничными условиями для температуры и скорости, на основании которых выводятся соответствующие соотношения для функции тока и завихренности. Поскольку задание искомых функций в начальный момент времени (в нестационарных задачах)

обычно принципиальных затруднений не вызывает, остановимся на проблеме постановки условий на границе объема жидкости.

Пусть Γ – регулярная линия границы в плоскости определения двумерной задачи; n – внутренняя нормаль к ней; s – длина дуги на линии Γ ; u и v касательная и нормальная составляющие вектора скорости на плоскости Γ . Вводя функцию тока, можно сказать, что на границе Γ

$$u = \xi \frac{\partial \psi}{\partial n}, \quad v = \xi \frac{\partial \psi}{\partial s} \quad (1.32)$$

Соотношения (1.32) используются при выводе граничных условий для функции тока и завихренности.

Рассмотрим несколько типичных ситуаций. **Твердая стенка.** Предположим, что жидкость примыкает к твердому телу, имеющему регулярную поверхность. В зависимости от типа задачи температура на Γ может, задана либо в явном виде, как известная непрерывная функция пространства и времени (граничные условия 1 рода), либо величиной теплового потока – условие 2-го рода), либо некоторым соотношением, связывающим значения температуры со значениями теплового потока (граничные условия 3-го рода) В последнем случае тепловой поток обычно считается пропорциональным разности между температурой T_∞ твердого тела на большом удалении от границы (на бесконечности)

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n_\Gamma} = \alpha(T_\Gamma - T_\infty), \quad (1.33)$$

где λ , α – коэффициенты теплопроводности и теплообмена соответственно. Все три условия описываются общей формулой

$$a \frac{\partial T}{\partial n_\Gamma} - bT_\Gamma + D_\Gamma. \quad (1.34)$$

Где при $a=0$ и $b \neq 0$ имеем условие 1-го рода (условие Дирихле), при $a \neq 0$ и $b=0$ – условие 2-го рода (условие Неймана), при $a \neq 0$ и $b \neq 0$ -условие 3-го рода. |

В более полной постановке задачу о теплообмене решают в области, состоящей из обеих соприкасающихся сред. При этом на линии раздела поддерживаются условия сопряжения (граничные условия 4 рода). Если на Γ отсутствуют посторонние источники или стоки условия сопряжения записываются в виде:

$$T_\Gamma^{(1)} = T_\Gamma^{(2)}, \quad \lambda^{(1)} \frac{\partial T^{(1)}}{\partial n_\Gamma} = \lambda^{(2)} \frac{\partial T^{(2)}}{\partial n_\Gamma}, \quad (1.35)$$

один из верхних индексов соответствует жидкости, а другой — среде, контактирующей с ней (в данном случае твердому телу).

На твердой поверхности, ограничивающей движущую вязкую жидкость, для скорости ставятся так называемые *условия прилипания*:

$$u_\Gamma^{(1)} = u_\Gamma^{(2)} = u_n \quad (1.36)$$

Ввиду (2.32) и (1.37) на неподвижной стенке имеем

$$u_n = 0, \quad \psi_n = const, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n_\Gamma} = 0 \quad (1.37)$$

Причем константу допустимо выбирать любой, например равную нулю. Так что условия прилипания в этом случае запишутся в виде

$$u_n = 0, \quad \psi_n = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial n_\Gamma} = 0. \quad (1.38)$$

Первое из них применяют в качестве граничного условия для функции тока, второе же служит для вычисления на Γ значений завихренности.

Свободная граница. Если жидкость, для которой решается задача конвекции, контактирует, не смешиваясь с другой жидкостью (или газом), температуру на границе контакта обычно задают условиями 3-го род. Строгая формулировка такой задачи должна условно, учитывать совместный процесс конвективного теплообмена в соприкасающихся средах, в каждой из которых следует рассматривать свою систему конвективных уравнений, удовлетворяя на линии раздела Γ условиям сопряжения (1.31).

На поверхности раздела двух вязких несмешивающихся жидкостей (жидкости и плотного газа) естественны условия прилипания (1.37). Кроме того, скорость должна удовлетворять кинематическому и динамическому условиям. Применяя их, когда линия раздела есть прямая, положение которой не изменяется во времени. Из кинематического условия в этом случае на Γ имеем

$$u = 0, \quad (1.39)$$

а из динамического – баланс касательных напряжений

$$\eta^{(1)} \frac{\partial u_s^{(1)}}{\partial n} = \eta^{(2)} \frac{\partial u_s^{(2)}}{\partial n} \quad (1.40)$$

где $\eta^{(1)}$ и $\eta^{(2)}$ – коэффициенты динамической вязкости контактирующих сред. В силу формул (1.32), (1.37), (1.39), (1.40) на прямой Γ можно получить следующие условия для функции тока и завихренности:

$$\psi_\Gamma = const = 0, \quad \frac{\partial \psi^{(1)}}{\partial n} = \frac{\partial \psi^{(2)}}{\partial n} \quad \eta^{(1)} \omega_\Gamma^{(1)} = \eta^{(2)} \omega_\Gamma^{(2)} \quad (1.41)$$

С помощью соотношений (1.40) строят приближенные соотношения, которые позволяют с учетом зависимости (1.41) выразить $\omega_\Gamma^{(1)} = \omega_\Gamma^{(2)}$ в явном виде.

Если жидкость граничит с газом, плотность которого мала, то здесь имеем *свободную поверхность*. Пусть свободная поверхность плоская и стационарная. Тогда для оставляющих скорости жидкости на линии Γ этой границы из кинематического и динамического условий $u_n = 0$, $\partial u_n / \partial n = v_n$ откуда находим

$$\psi_\Gamma = 0, \quad \omega_\Gamma = 0. \quad (1.42)$$

Линия симметрии. Пусть Γ — прямая, являющаяся линией симметрии конвективного движения. Условие симметрии задаются в виде

$$\frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma}} = 0, \quad u_{n_{\Gamma}} = 0, \quad \frac{\partial u_n}{\partial n_{\Gamma}} = 0. \quad (1.43)$$

Отсюда в силу (1.32) получаем

$$\frac{\partial T}{\partial n_{\Gamma}} = 0, \quad \psi_{\Gamma} = const = 0, \quad \frac{\partial}{\partial n} \left(\xi \frac{\partial \psi}{\partial n} \right)_{\Gamma} = 0. \quad (1.44)$$

В случае осесимметричного течения в цилиндрических координатах r, z линией симметрии является вертикальная ось $r=0$. На основании (1.44), уравнений функции тока и завихренности (1.2) на ней должно выполняться

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (1.45)$$

При постановке плоских задач конфигурация границы и температурные условия на ней нередко выбираются симметрично относительно средней вертикальной линии Γ . Это позволяет решать задачу только на половине ее области определения, считая Γ частью границы. На линии симметрии Γ правомерны условия для случая декартовых координат x, y :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (1.46)$$

Особые точки. Если в неподвижной массе жидкости с постоянной температурой T_{∞} поместить более нагретое твердое тело, в жидкости возникнет конвективное движение. Интенсивность этого движения сравнительно велика лишь вблизи нагревателя, но быстро падает по мере удаления от него. На бесконечности естественно ожидать $u=0$ с вытекающими отсюда условиями для функции тока и завихренности:

$$\psi = 0, \quad \omega = 0. \quad (1.47)$$

Вызванные естественной конвекцией возмущения температуры следуют той же тенденции, т. е. на бесконечности они затухают, поэтому температура здесь считается неизменной:

$$T = T_{\infty}. \quad (1.48)$$

При численном решении таких задач расчетная область обычно задается ограниченной, а условия (1.47), (1.48) ставятся на внешней границе этой области, которая выбирается на конечном, хотя и достаточно большом, расстоянии от твердой стенки.

На практике форма границы нередко описывается ломаной линией, состоящей из регулярных кусков, и тогда может возникнуть потребность в дополнительных соотношениях, определяющих T, ω и ψ в угловых точках границы.

Рассмотрим угол, образованный двумя регулярными участками границы (стенка – стенка, свободная поверхность – стенка), и пусть на них выполняются условия вида (1.34), (1.37) или (1.43). Следует помнить, что температура в угловой точке должна оставаться непрерывной, удовлетворяя условиям, которые приняты на смежных участках границы. Угловое значение функции тока выбирается таким же, как и на остальной части границы: $\psi = 0$.

Обсудим проблему вычисления завихренности в угловой точке. Величину угла γ условимся измерять в сторону жидкости, так что $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ соответствует вогнутым углам, а $180^\circ < \gamma < 360^\circ$ — выпуклым. Если угол вогнутый и прямой ($\gamma=90^\circ$), из уравнения для функции тока и с помощью (1.37), (1.43) в его вершине легко получить $\omega = 0$.

Переходя к косоугольным координатам, можно показать, что это условие справедливо при любых $0^\circ < \gamma < 180^\circ$. Существует предположение, что в вершине выпуклого угла завихренность терпит разрыв и определяется неоднозначно. Поэтому при $180^\circ < \gamma < 360^\circ$ рекомендуется пользоваться теми же приближенными формулами, что и на регулярных участках стенок, образующих выпуклый угол. Эти формулы дадут два различных угловых значения ω . В алгоритме используется как одно, так и другое в зависимости от того, с какой стороны выступа ведется счет.

1.5. Оценка применимости математической модели

Изложенные математические модели формирования стальных изделий нуждаются в сопоставлении с экспериментальными результатами и оценкой адекватности процессам реального производства.

С целью оценки корректности предложенной математической модели и вычислительного алгоритма экспериментальным результатам, был проведен ряд тестовых вычислительных экспериментов, целями которых были:

- определение условий и ограничений, накладываемых на выбор параметров аппроксимации, для обеспечения устойчивости и сходимости выбранной разностной схемы;
- доказательство применимости выбранной методики численной реализации математической модели;
- определение, насколько адекватно математическая модель описывает реальные физические процессы.

1.6. Адекватность применения предложенной математической модели

Как показывают численные эксперименты, обеспечить устойчивость задачи для различных вариантов конфигурации слитков и режимов внешних и внутренних воздействий на металл возможно при наложении на шаг по времени ограничения, задаваемого условием Куранта-Фридрихса-Леви [1]:

$$\tau < \frac{h}{|u|}. \quad (11.1)$$

Это условие применяется для явных схем и при больших числах Gr и Re, накладывает жесткое ограничение на величину временного шага h и скорости течения расплава u . Так, в условиях естественной конвекции для крупных слитков ($Gr \sim 10^{10}$) временной шаг не должен превышать значения $\tau = 10^{-5}$ (в размерных значениях, согласно критерию Фурье – 0,15 с), что согласуется

с данными других авторов [2]. При вынужденной конвекции, когда скорости в области пульсирующей затопленной струи достигают значений ~ 1 м/с, величина временного шага составляет $\sim 10^{-8} \div 10^{-9}$ (в зависимости от размера слитка). Однако при современных возможностях вычислительной техники данное ограничение не приводит к существенному снижению эффективности программного обеспечения.

При выборе пространственной сетки требовалось выполнение следующего условия для относительной погрешности расчета максимального значения функции тока ψ_m :

$$\left| \frac{\max \psi_{J2} - \max \psi_{J1}}{\max \psi_{J2}} \right| \leq 0.05, \quad (11.2)$$

где: индексы $J1, J2$ – число разбиений координат.

Как показали предварительные тестовые расчеты, наиболее оптимальным вариантом для рассматриваемой системы является сетка с количеством узлов 33×40 . Установлено, что увеличение числа шагов вдвое приводит к изменению результатов на 3%, при уменьшении числа шагов сетки вдвое сходимость ухудшается, а результаты отличаются более чем на 22%.

В качестве критерия итерационной сходимости разностной схемы использовалась относительная ошибка счета (P_ψ) при решении уравнения Пуассона:

$$P_\psi = \max \left| \frac{\psi_{ij}^{s+1} - \psi_{ij}^s}{\psi_{ij}^{s+1}} \right| \leq \varepsilon, \quad (11.3)$$

где: s – количество итераций; ε – точность счета.

В результате тестовых расчетов установлено, что при значении параметра итерации $\sigma = 0,0001$ и точности счета $\varepsilon = 0,0001$ уравнение Пуассона сходится за 30 итераций (рис.1.11) для этапа вынужденной конвекции. На этапе термогравитационной конвекции число итераций N , необходимых для достижения итерационной сходимости функции тока (на графике P_ψ) равно 16.

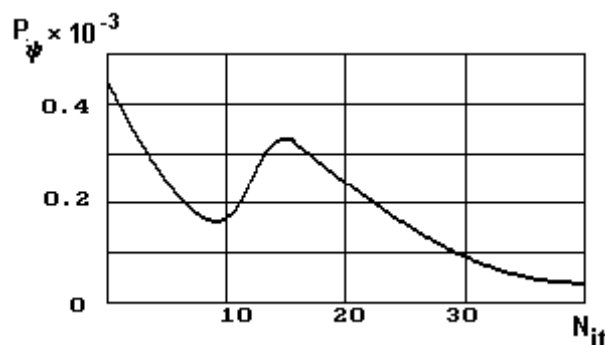


Рис.1.11. Кривая сходимости для уравнения Пуассона

Чтобы определить диапазон применимости выбранной методики численной аппроксимации (в частности, метода возмущенного оператора с разностью против потока), были выполнены тестовые расчеты некоторых клас-

сических задач с использованием разработанной модели и вычислительного алгоритма. В частности, была решена задача тепловой гравитационной конвекции в замкнутой квадратной области с подогревом сбоку. Математическое описание данной физической системы представляет собой систему уравнений, которая замыкается следующими граничными условиями:

$$y = 0, \quad y = 1, 0 \leq x \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0; \quad (11.4)$$

$$x = 0, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \theta = 1; \quad (11.5)$$

$$x = 1, \quad 0 \leq y \leq 1, \quad \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad \theta = 0 \quad (11.6)$$

Расчеты осуществлялись на равномерной сетке размером 65×65 (оптимальных для геометрии этой области) для значения $Pr = 0,71$. На Рис.1.12 приведены полученные результаты расчетов, для значений числа Грасгофа $Gr = 1,25 \cdot 10^4$ и $Gr = 10^5$.

Видно, что в области образуется циркуляционное течение, перемешивающее жидкость и переносящее тепло от нагретой стенки к холодной, а при увеличении числа Грасгофа до 10^5 в ядре появляются вторичные внутренние течения. Данная картина течения совпадает с приведенными в работе [3] результатами численного моделирования, соответствие которых реальным физическим процессам подтверждено экспериментально.

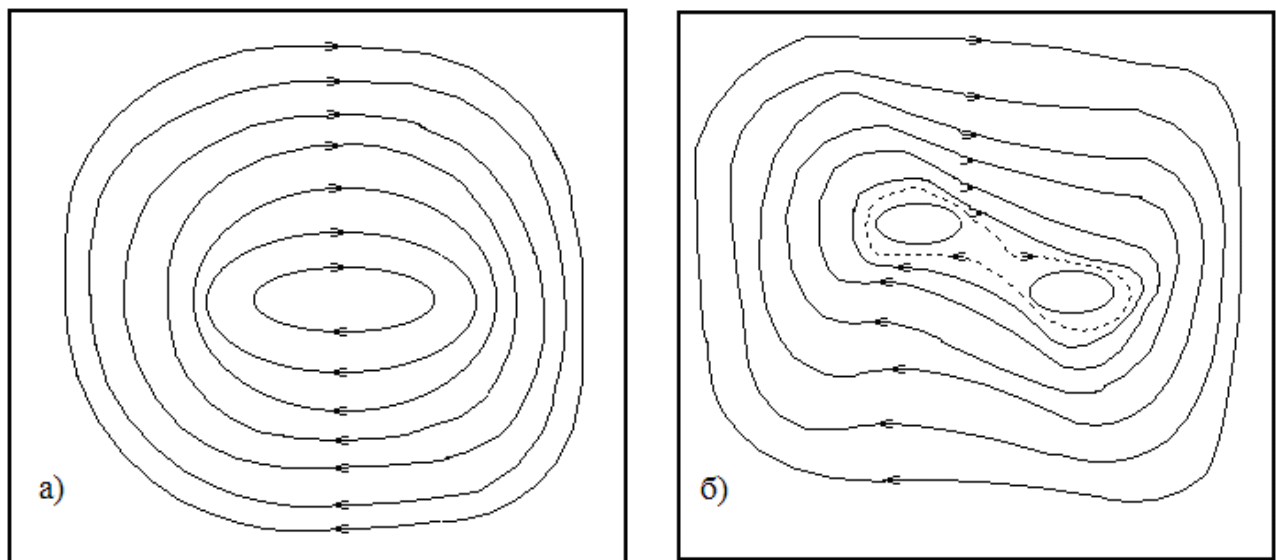


Рис.1.11. Изолинии функции тока при термогравитационной конвекции в квадратной области с боковым подогревом при $Gr = 1,25 \cdot 10^4$ (а) и $Gr = 10^5$ (б)

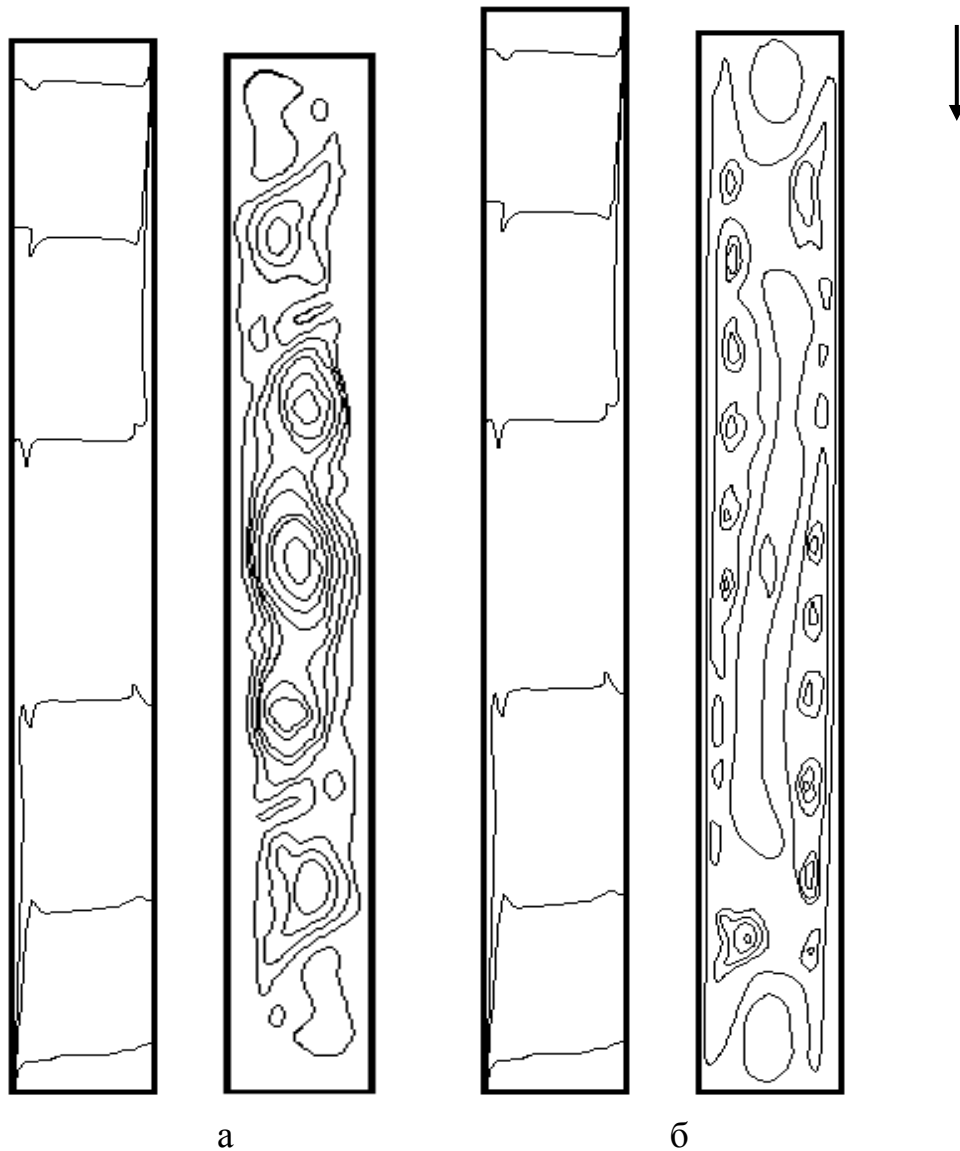


Рис.1.13. Изотермы для безразмерной температуры Θ и изолинии функции тока при естественной конвекции в вертикальном слое: а – экспериментальные данные [4], б – результаты численных исследований

Также были рассмотрены режимы конвективного течения и теплообмена в вертикальном слое (отношение ширины области к ее высоте $H/L=20$) с фиксированным перепадом температур между стенками и теплоизолированными основаниями. Данная задача представляет особый интерес, так как в рассматриваемых условиях достигаются большие значения чисел Gr и Pr , как и в случае затвердевания крупных стальных слитков. Как видно из Рис.1.13 при $Pr=15$ и $Ra=1,5 \cdot 10^9$ возникает система мелких вихрей в пристеночной области, что соответствует данным экспериментальных и численных исследований, выполненных другими авторами [4].

Таким образом, в результате сопоставления установлено, что математическая модель обеспечивает адекватный перенос большинства наблюдаемых на физической модели эффектов в части гидродинамики и теплопереноса.

1.7. Адекватность расчетных и экспериментальных данных

Созданные математические модели формирования многослойных композиций сталей использованы для прогнозирования технологических параметров и свойств композиций стали.

При проведении вычислительного эксперимента определялась толщина корки на боковой поверхности слитка в зависимости от времени кристаллизации первого металла, заливаемого с начальной температурой 1600°C . При этом видно (рис.1.14), что после заливки второго металла с температурой 1570°C наименьшая толщина корочки наблюдается при выдержки металла 5 минут, а наибольшая при 15 минутах. Все графики строились в одно и тоже время.

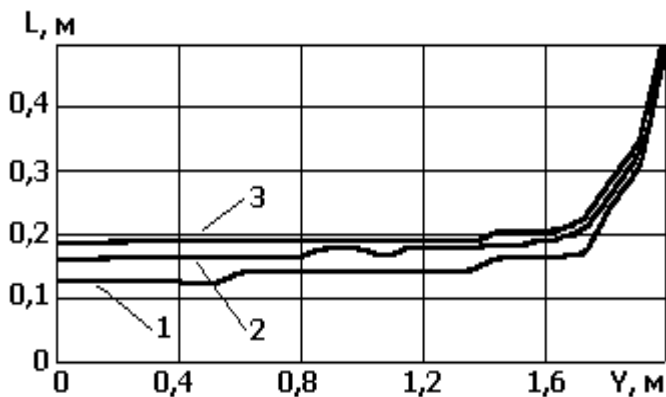
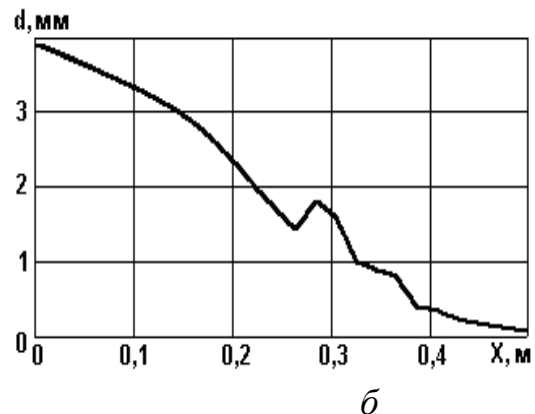
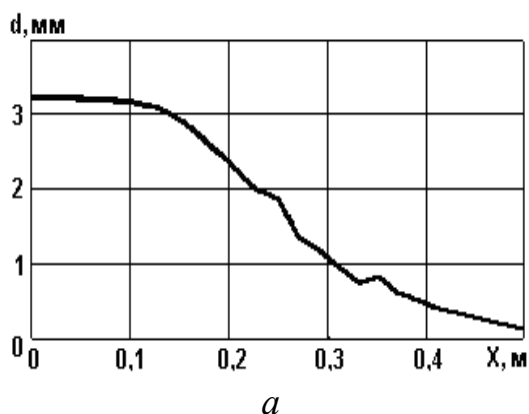


Рис.1.14. Изменение толщины корки (L) по высоте боковой поверхности изложницы (Y).

При различной продолжительности выдержки металла: 1- 5 минут; 2- 10 минут; 3- 15 минут после доливки второго сплава

Размер дендритов в слитке определяли в зависимости от выдержки металла при тех же температурных режимах (рис.1.15). Наибольшее влияние гидродинамических и теплофизических процессов на формирование отливки наблюдается при выдержке металла 10 и 15 минут.

Выполненный расчет толщины холодной вставки позволяет оценить геометрические размеры холодной вставки, используемой в двух целях. Для получения многослойной отливки с необходимой толщиной поверхностного слоя и для улучшения качества осевой зоны отливки за счет растворения пластины заливаемого в изложницу металлом.



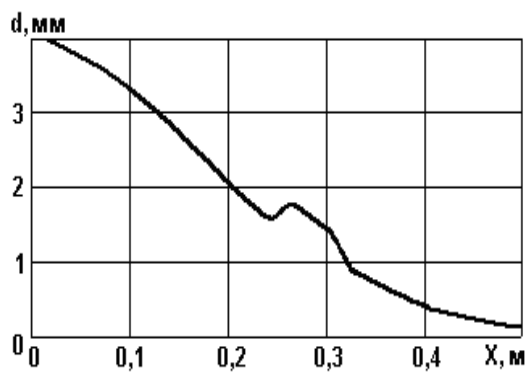


Рис. 1.15. Размер зерна дендрита (d) по ширине слитка (X). Интервал выдержки металла до долива сплава второго состава.

а) – 5 минут; б) – 10 минут; в) – 15 минут

в

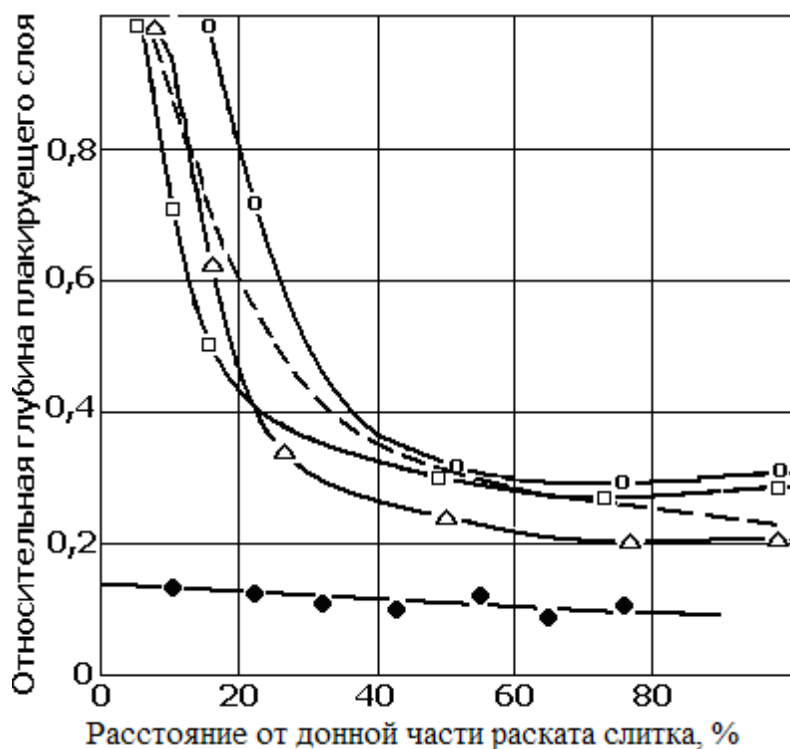


Рис. 1.16. Изменение толщины плакирующего слоя по длине раската из композиции хромистых сталей при различном времени кристаллизации тела слитка до долива сплава второго состава: ● 7 мин 50 с; Δ – 8 мин 45 с; □ – 11 мин; ○ – 13 мин 15 с; ----- вычислительный эксперимент (время 13 мин 15с)

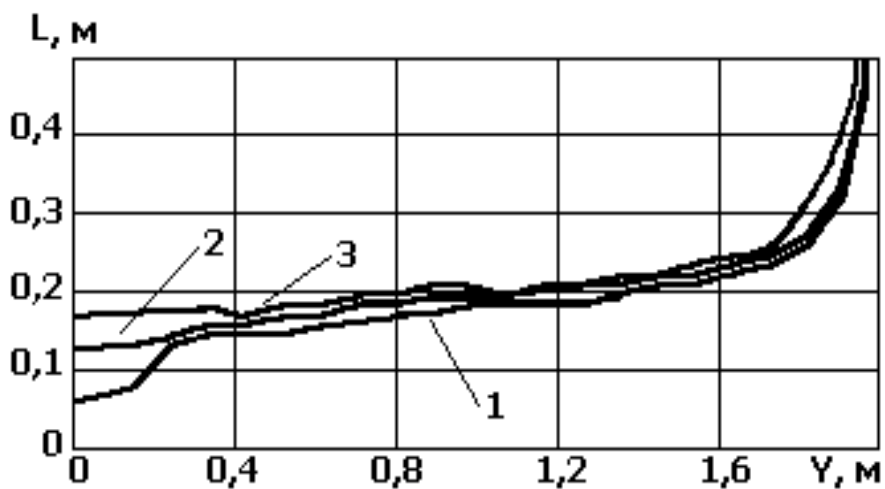


Рис.1.17. Изменение толщины корки (L) по высоте боковой поверхности слитка (Y). Диаметр внутреннего холодильника: 1- 20мм; 2- 40мм; 3- 80мм. Время выдержки после долива 17 минут

Результаты вычислительного эксперимента и экспериментальные данные изменения толщины поверхностного слоя по длине многослойного раската из композиции хромистых сталей при различном времени затвердевания сплава первого состава до долива второго приведены на Рис.1.16.

Расчетные зависимости толщины поверхностного слоя удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными. Погрешность расчета составляет 20%. Полученные данные позволяют рекомендовать математическую модель для прогнозирования толщины поверхностного слоя в зависимости от времени кристаллизации первого сплава до долива сплава второго состава.

Таким образом,

- разработана обобщенная математическая модель гидродинамических и теплообменных процессов в системе слитков – окружающая среда;
- подтверждена адекватность математических моделей и вычислительных алгоритмов на основании сравнения результатов численного моделирования и экспериментальных аналитических исследований, проведенных другими авторами.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Зимик В.Д. Турбулентная конвекция / В.Д.Зимик, П.Г.Фрик. – М.: Наука, 1988. – 173 с.
2. Garon A.M., Goldstein R.J. Velocity and heat transfer measurements in thermal convection // Phys. Fluids 1973. vol.16, № 11, p.1818-1825.
3. Гебхард Б. Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен // Б.Гебхард, И.Джалурия, Р.Л.Махаджан, Б.Саммакия. – М.: Мир, 1991, кн.1. – 528 с.
4. Белоусов В.В. Численное исследование гидродинамических и теплофизических процессов при разливке стали сверху / В.В.Белоусов, Ф.В.Недопекин, И.В.Куликов // Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1984, №7. – С.56-59.
5. Ефименко С.П. Численное исследование гидродинамики расплава при сифонной заливке / С.П.Ефименко, Ф.В.Недопекин, П.Ф.Завгородний, В.В.Белоусов // Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1981, № 12. – С.63-66.
6. Ефимов В.А. Пути совершенствования разливки стали / В.А.Ефимов, В.П.Осипов, В.П.Гребенюк. – М.: Металлургиздат, 1963. – 184 с.
7. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А.Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
8. Зекели Дж. Анализ гидродинамических явлений в ковшах при холодном моделировании / Дж.Зекели, Н.Х.Эль-Кадах, Дж.А.Грэвет // В кн. Инжекционное моделирование 80. – Лелау, Швеция, 1980. – М.: Металлургия, 1982. – С. 86-90.
9. Эль-Кадах Н.Х. Турбулентность и перемешивание в технологических процессах в ковшевой металлургии / Н.Х.Эль-Кадах, Дж.Зекели // В кн. Инжекционное моделирование, 1983. – Лелуа, М.: Металлургия, 1986. – С.90-105
- 10.Бронштейн И.С. Численное исследование нестационарной термогравитационной конвекции в замкнутой полости / И.С.Бронштейн, Г.З.Гершуни, Е.М.Жуховицкий и др. // В кн.: Гидродинамика, Пермь, 1974, вып.5. – С.207-209.
- 11.Завгородний П.Ф. Экспериментальное исследование воздействия МГД на качество слитка / П.Ф.Завгородний, В.Д.Зорина, Г.В.Кудренко, Г.М.Севастьянов // В кн. Проблемы стального слитка. – М.: Металлургия, 1978, № 7. – С.132-136.
- 12.Пасконов В.М. Численное моделирование процессов тепло- и массопереноса / В.М.Пасконов, В.И.Полежаев, Л.А.Чудов. – М.: Наука, 1988. – 288 с.
- 13.Полежаев В.И. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И.Полежаев, А.В.Буне, Н.А.Верезуб и др. – М.:Наука,1987. – 271 с.
- 14.Сугаванам А. Численное исследование отрывного обтекания профилей турбулентным потоком / А.Сугаванам, Дж.Ву. // Ракетная техника и космонавтика, 1982, том.20. – № 5. – С.20-27.

15. Chapman D.R., Mark H, Pirtle M.W. Computerc vs wind tunnels for aerodynamic flow simulations Aeronautics and Astronautics, vol. 13, 1975, pp. 21-30.
16. Коваль В.П. Движение расплава в изложнице при сифонной заливке / В.П.Коваль, В.А.Шиловский // Изв. вузов. Черная металлургия, 1981, №12. – С.63-66.
17. Дж.Бу. Численный метод расчета турбулентных течений / Дж. Бу., А.Сугаванам // Ракетная техника и космонавтика 1978, том.16, № 9. – С.105-114.
18. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flow Computer methods in applied mechanics and engineering, vol. 3, №2, 1974, pp. 269-288.
19. Jones V.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a 2 equation model of turbulence/ International Journal of Heat and mass transfer, vol 15, pp 301-314.
20. Harsha P.T. Prediction of free turbulent kinetic energy method, Free Turbulent Shear Flows, Vol.1, Conference Proceeding, NASA report № SP-321, p . 463-519.
21. Rodi W. The prediction of free turbulent boundary layers by use of a two-equation model of turbulence, Ph.D.dissertation, University of London 1972.
22. Острач С. Естественная конвенкция в замкнутых объемах / С.Острач // Современное машиностроение, Серия А, 1989, № 6. – С.81-103.
23. Ostrach S. Natural convection inside a horizontal cylinder / S.Ostrach, R.Hantman // Chem.Engr.Comm., 1981, vol 9, pp.213-244.
24. Ян К.Т. Переходы и бифуркации при ламинарной термогравитационной конвекции в замкнутых полостях / К.Т. Ян // Современное машиностроение, Серия А, 1989, № 6. – С.103-127.
25. Математическое моделирование гидродинамических и теплофизических процессов формирования отливок для энергомашиностроения. Разработка математической модели теплофизических и гидродинамических процессов при затвердевании отливки: Отчет о НИР (промежуточный) Донецк. гос.ун-т; руководитель Ф.В.Недопекин. – № u.h.086.0048419; Инв. №02890019254. – М., 1988. – 45 с.: ил. – Отв. исполнитель В.В.Белоусов. – библиогр. 45.
26. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д.Ши. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
27. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г.Шлихтинг. – М.: Наука, 1974. – С.350.
28. Турбулентность принципы и применения // Под ред. У.Фроста, Т.Молдена. – М.: Мир, 1980. – 526 с.
29. Р.Маргинузи, А. Поллард. Исследование применимости различных моделей турбулентности для расчета турбулентных течений в трубах. Часть 1. Алгебраические модели для напряжений и k- ϵ -модели // Аэрокосмическая техника № 9, 1989. – С. 43-53.

30. Р. Маргинузи, А. Поллард. Исследование применимости различных моделей турбулентности для расчета турбулентных течений в трубах. Часть 11. Алгебраические модели для напряжений и $k-\epsilon$ -модели // *Аэрокосмическая техника* № 9, 1990. – С. 43-53.
31. Артюхов Л.Ю. О численном моделировании турбулентной полуограниченной струи / Л.Ю. Артюхов, В.П. Кошкариков, И.В. Локтионов // В кн. *Тепломассоперенос в жидкостях и газах.* – Алма-Ата, из-во КазГУ, 1982. – С. 63-68.
32. Kulacki F.A., Richards D.E. Natural convection in plane layers and cavities with volumetric energy sources in: *Natural convection fundamentals and applications*, S.Kakas, W.Aung, R. Viskanta, eds., Hemisphere publishing Corporation, Washington, DC, pp. 179-258.
33. Фарук Б. Турбулентная тепловая конвекция в замкнутой полости с внутренним тепловыделением / Б. Фарук. – *Теплопередача*, 1988, №4. – С. 105-112.
34. Овчинников М.И. Математическая модель турбулентного течения металла в ковше установки АСЕА-СКФ / М.И. Овчинников, В.А. Щербаков // *Изв. Вузов. Черная металлургия.* – 1990. – №7. – С. 37-39.
35. Зекели Дж. Теплопередача и массоперенос при перемешивании металла в разливочном ковше / Дж. Зекели // В кн. *Инжекционное моделирование 80.* – Лелау, Швеция, 1980, М.: Металлургия, 1982. – С. 99-95.
36. Зекели Дж. Компьютерное конструирование САД-САМ-метод промежуточного разливочного устройства / Дж. Зекели, Н. Эль-Каддах // В кн. *Инжекционное моделирование 80.* – Лелау, Швеция, 1980, М.: Металлургия, 1982.
37. Гутри Р.И.Л. Физико-химические и гидродинамические аспекты легирования расплавов методом вдувания порошков / Р.И.Л. Гутри // В кн. *Инжекционное моделирование 80.* – Лелау, Швеция, 1980, М.: Металлургия, 1982. – С. 75-92.
38. Кулаки Ф.А. Естественная конвекция в горизонтальном слое жидкости с распределенными по объему источниками тепла / Ф.А. Кулаки, М. Нэгл // *Теплопередача*, 1975, №2. – С. 49.
39. Kulacki F.A., Emara A.A. Steady and transient thermal convection in a fluid layer with uniform volumetric energy sources // *J. of Fluid Mech.* 1977, v.83, p.375-395.
40. Роди В. Модели турбулентности окружающей среды / В. Роди // В кн. *Методы расчета турбулентных течений.* – М.: Мир, 1984. – С. 227-322.
41. Ладыженская О.А. Краевые задачи математической физики / О.А. Ладыженская. – М.: Наука, 1973. – 334 с.
42. Ostrach S. Completely Confined Natural Convection > Development Mechanics, Vol.4, Proc. Tenth Midwestern Mechanics Conf. Johnson Publ Co. 1968 pp.53-81.
43. Peaceman D.W., Rachford H.H. The numerical solution of parabolic and elliptic differential equations // *J. Soc. Indust. Appl. Math.* 1965, v.3, No.1, pp.28-41.

44. Paris J., Whitaker S. Confined wakes: a numerical solution of the Navier-Stokes equations // Amer. Inst. of Chem. Eng. J. 1965, v.11, No.6, pp.1033-1041.
45. Vanka S.P. Block-implicit multigrid solution of Navier-Stokes equations in primitive variables // J. of Computational Phys. 1986, v.65, pp.135-158.
46. Онянов В.А. Численные эксперименты по использованию различных разностных схем для задач свободной конвекции в замкнутой области / В.А.Онянов, Е.Л.Тарунин // Уч. записки Перм. ун-та. Гидродинамика. 1975. № 327. – С.156-181.
47. Peyret R., Taylor T.D. Computational methods for fluid flow. N.Y >etc.: Springer, 1983.
48. Грязнов В.Л. Исследования некоторых разностных схем и аппроксимаций граничных условий для численного решения уравнений тепловой конвекции / В.Л.Грязнов, В.И.Полежаев // Препр. ИПМ АН СССР №40. – М.: 1974. – 66 с.
49. Harlow F.E., Fromm J.E. Dynamics and heat transfer in the von Karman wake of a rectangular cylinder // Phys. of Fluids 1964, v.7, No.8, p.1147-1156.
50. Грязнов В.Л. Численное моделирование турбулентного режима конвекции в вертикальном слое / В.Л.Грязнов, В.И.Полежаев // Известия АН СССР МЖГ. 1977, № 5. – С.8-15.
51. Грязнов В.Л. Численное решение нестационарных уравнений Навье-Стокса для турбулентного режима естественной конвекции / В.Л.Грязнов, В.И.Полежаев // Препр. ИПМ АН СССР № 81. М., 1977. – 56 с.
52. Kutateladze S.S., Kirdyashkin A.G., Ivakin V.P. Turbulent natural convection in a vertical plate in a vertical layer // Inter.J. Heat and Mass transfer. 1972. Vol.15 №2. P.193-202.
53. Белоусов В.В. Тепломассоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности / В.В.Белоусов, Ф.В.Недопекин, И.Л.Повх // ИФЖ, 1994, том 67, № 3-4. – С. 202-208.
54. Соболев В.В. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье / В.В.Соболев, П.М.Трефилов. – М.: Металлургия, 1988. – 160с.
55. Ф.В.Недопекин Численное моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в затвердевающем стальном слитке / Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов, А.Я.Гриценко. – Изв.ВУЗов. Черная металлургия, 1991, №7. – С.70-73.
56. Недопекин Ф.В. Машинное моделирование химической неоднородности в затвердевающем стальном слитке / Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов, А.Я.Гриценко // В кн. Автоматизация проектирования и управления качеством отливок. Материалы 4 конф. С.Петербург 1991, с.38-42.
57. Belousov V.V. Hydrodynamics and heat and mass-transfer in the steel ingot mould system / V.V.Belousov, F.V.Nedopeokin // Heat and mass transfer technological processes. Abstracts of reports of Int.conf. Jurmala 1991. p.p. 73-74.

58. Недопекин Ф.В. Тепломассоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности / Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов, И.Л.Повх // ИФЖ 1994, том 67, № 3-4. – С.202-208.
59. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики и затвердевания при формировании слитков и отливок / Ф.В.Недопекин // ИФЖ -1989, т. 57, № 3. – С.450-458.
60. Шмрга Л. Затвердевание и кристаллизация стальных слитков / Л.Шмрга. – М.: Металлургия, 1985.- 248 с.
61. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование сопряженных процессов гидродинамики, тепломассопереноса и затвердевания при формировании слитков и отливок / Ф.В.Недопекин // ИФЖ. – 1989. – Т.57, №3. – С.450-458.
62. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамики и тепломассопереноса в слитках (научная монография) / Ф.В.Недопекин. – Ижевск, Удмуртский университет, 1995. – 236 с.
63. Белоусов В.В. Тепломассоперенос в затвердевающем бинарном расплаве в условиях смешанной конвекции с учетом турбулентности / В.В.Белоусов, Ф.В.Недопекин, И.Л.Повх // ИФЖ , 1994, том 67, № 3-4. – С. 202-208.
64. Соболев В.В. Теплофизика затвердевания металла при непрерывном литье / В.В.Соболев, П.М.Трефилов. – М.: Металлургия, 1988. – 160 с.
65. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А.Самарский. – М.: Наука, 1989. – 616 с.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведение вычислительного эксперимента в машиностроительных, металлургических и энергетических отраслях промышленности, как правило, связано с решением разнообразных задач математической физики, таких как задачи гидро- или газодинамики, распространения тепла, переноса частиц и др. Формально каждая из таких задач описывается сложной системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных (или интегральных, или интегро-дифференциальных уравнений), в которой выражается связь известных и искомых величин (давление, плотность, температура, скорость вещества и др.) в координатах пространство – время.

Важно подчеркнуть, что особенно для такого типа вычислительного эксперимента, всегда существует некоторая возможность варьирования в постановках задач, определяемая множеством переменных значений параметров и конструкций выражений (подвыражений), входящих в запись основной системы уравнений (например, правых частей), множеством уравнений состояния, граничных условий, а также начальных значений основных величин и др.

Существуют различные численные методы решения задач математической физики. Применение того или иного метода приводит к алгоритму решения соответствующей системы уравнений. И здесь необходимо отметить существование некоторой так называемой вариабельности в конструкциях алгоритмов, которая определяется множеством переменных значений различных факторов, влияющих на алгоритм. Например, для разностных методов – это различные типы расчетных сеток, различные разностные схемы, способы интерполяции, методы решения систем алгебраических уравнений и др.

Множество требований к сервису задачи, идущих от исследователя, производящего вычислительный эксперимент, также образует соответствующую вариабельность. Она определяется в основном многообразием способов, форм и режимов задания исходной и представления результатной информации, т. е. многообразием методов взаимодействия человека и задачи.

Таким образом, при формировании расширенного понятия задачи, связанного с ее решением на ЭВМ (особенно многофакторных задач, которые имеют место в литейных технологиях), существуют факторы, вносящие определенную вариабельность в это понятие. Если каждый фактор связать с координатой и на осях отложить диапазоны вариабельности, то получим пространство вариабельности задачи в расширенном понятии. Очевидно, что каждая точка такого пространства есть полностью конкретизированная задача, которую будем называть вариантом. Таким образом, задача есть множество вариантов.

Перейдем к рассмотрению различных общих подходов к построению программного обеспечения для решения задач математической физики.

Первый подход – это создание единой программы, обеспечивающей полное решение какой-либо одной задачи, т. е. решение любого варианта этой задачи. Это традиционный подход, широко применявшийся ранее и применяющийся в настоящее время. Таким способом создавались в основном большие программы математической физики.

Необходимо заметить, что этот подход реально существует только в пределах определенного ограничения сверху объема пространства варибельности задачи. Это допустимо, когда объем и сложность программного обеспечения и связанные с ними объем, и сложность разработки, и познания, эксплуатации, сопровождения и развития, позволяют представить это программное обеспечение в рамках единой программы.

Тенденция к усложнению задач для проведения вычислительного эксперимента, о которой говорилось выше, приводит к превышению допустимого объема пространства варибельности. При этом объем и сложность программного обеспечения становятся настолько большими, что резко увеличиваются трудности (вплоть до принципиальной невозможности) представления этого программного обеспечения в виде единой программы. В этих условиях применяется другой подход, который состоит в создании множества программ, каждая из которых отвечает какой-то части «пространства варибельности» задачи, при этом объединение всех подобных частей представляет это пространство. Объем каждой части в этом случае не должен превосходить допустимого предела, тогда разработка программ будет осуществляться в условиях первого пути.

Таким образом, может быть решена проблема сложности при создании программного обеспечения больших задач математической физики.

Описанные подходы к созданию прикладного программного обеспечения вычислительного эксперимента, не предполагают никаких специальных средств системного программного обеспечения, и могут быть реализованы на базе штатных систем общего программного обеспечения ЭВМ.

Дальнейшим развитием подхода к созданию прикладных программ явился подход, основанный на модульном принципе.

Он заключается в следующем:

1. Глубокий и детальный анализ пространства варибельности задачи (а именно, анализ физико-математического описания задачи, алгоритма ее решения, требований к сервису и др.) для разложения расширенного понятия задачи на базовые части (каждая из которых свободна или почти свободна от варибельности) такие, чтобы объединение этих частей совпадало со всем пространством варибельности задачи.

В качестве примеров таких частей, которые будем называть функциональными модулями, можно привести способы вычисления текущего шага по времени, способы вычисления коэффициентов разностных уравнений, методы решения систем алгебраических уравнений, различные уравнения состояния, граничные условия, функции источников, методы интерполяции, вычис-

ления интегралов, трансляторы с языков задания исходных данных, генераторы различных форм выдачи результатов и др.;

2. Реализация каждой полученной части в виде программного модуля, т.е. программы, представленной так, что она могла использоваться в контекстах разных программ;

3. Формирование (конструирование) требуемой программы или множества программ из программных модулей.

Следует подчеркнуть, что модульный подход сочетает в себе возможности первого и второго подходов, описанных выше, т. е. таким путем на основе фиксированной совокупности модулей можно построить как достаточно сложную единую программу, так и множество более простых программ, функционально эквивалентных в сумме этой одной программе.

2.1. Анализ пакетов прикладных программ формирования отливок

Гидродинамические и теплофизические явления при разливке и формировании слитка в изложнице в настоящее время недостаточно изучены. Незнание всего комплекса физических процессов и факторов, влияющих на формирование слитка, не позволяет решать вопросы производства высококачественных слитков и создания технологических процессов с оптимальными параметрами выплавки, разливки и охлаждения слитка, и, как следствие, ведет к излишним затратам энергоресурсов, не эффективному использованию оборудования. Следовательно, актуальной задачей разработки оптимальной технологии производства слитков, в том числе, колесной стали, является всестороннее исследование работы системы слиток – изложница – окружающая среда.

В связи с возникновением значительных трудностей при теоретическом исследовании вышеописанных процессов, а также технологическими и экономическими проблемами, связанными с горячим и холодным моделированием в металлургии, наиболее приемлемым методом исследования является математическое моделирование с использованием современной вычислительной техники. Кроме того, математическое моделирование позволяет комплексно изучить тепловые и гидродинамические явления в неотъемлемом их единстве и получить поля температур и скоростей в любой точке расплава для каждого момента времени.

В настоящее время в различных отраслях, в частности в металлургии, всё чаще применяют системы моделирования, экономичность затрат при использовании которых очевидна по сравнению с опытными исследованиями. Одной из таких систем является система автоматизированного моделирования «ПОЛИГОН». Эта система позволяет проработку некоторых наиболее важных технологических параметров не на реальной отливке, а на ее модели, программно реализованной на компьютере.

Программа «ПОЛИГОН» предназначена для моделирования литейных процессов. При этом численными методами моделируются:

- гидродинамические процессы при заливке;

- тепловые процессы при затвердевании;
- процессы образования макро- и микропористости;
- процессы образования усадочных раковин.

Одним из основных вопросов моделирования литейных процессов является решение задачи литья и затвердевания отливки. Точность решения такой задачи является критерием качества изготавливаемой детали. Программа предназначена для расчета гидродинамических процессов в отливках сложной конфигурации, в которых сложная форма может являться причиной торможения конвективных потоков. Это свидетельствует о незначительном влиянии гидродинамики на теплоперенос и кинетику затвердевания. В тоже время, в слитках, особенно крупных, вклад гидродинамики является определяющим как в период наполнения, так и формирования слитка [1-4]

В настоящее время, к сожалению, приходится констатировать, что в большинстве моделирующих систем усадочная задача решается на основе крайне упрощенных моделей, которые не соответствуют современным возможностям численного моделирования. Практически можно считать, что ни в одной системе моделирования ЛП, кроме САМ ЛП “Полигон”, усадочная задача не решается на основе современных физических моделей. Чаще всего под расчетом усадочных дефектов в таких системах подразумевают обработку тепловых полей по относительно простым критериям типа критерия Найямы или, в лучшем случае, проводят упрощенный расчет макропористости или раковин без учета фильтрационных процессов и сложной структурированности двухфазной зоны. Таким образом, основной вид литейных дефектов (микро- и макропористость, раковины) большинство современных литейных систем не моделируют. Кроме того, при анализе моделирующих систем большинство авторов сравнительных обзоров даже не упоминают об отсутствии в них адекватного численного моделирования усадочных процессов, предпочитая упомянуть о “тепловом расчете с учетом усадки”, не раскрывая отсутствие моделирования фильтрационно-усадочных процессов при затвердевании. В связи с этим, обсуждение принципов моделирования усадочных процессов представляется необходимым.

При моделировании питания отливки необходимо учитывать как минимум два различных механизма образования усадочных дефектов. По 1-му механизму образуются макропористость и раковины, по 2-му микропористость [5]. В данном случае эти виды пористости разделены не по величине пористости, а по механизму образования, который, в свою очередь, и определяет предельный уровень пористости. Например, микропористость не может быть много больше объемной усадки при затвердевании, которая обычно составляет 3...5%, а макропористость может достичь 10...30% и в пределах образовать концентрированную раковину (100% пористости). Представим общую характеристику этих механизмов, а затем рассмотрим принципы моделирования каждого механизма.

Макропористость образуется при недостатке питания (отсутствии необходимого объема металла для компенсации усадки) выше зеркала расплава или

его условного эквивалента в двухфазной зоне (поскольку объединение условного зеркала в двухфазной зоне и реального зеркала жидкой зоны геометрически может представлять собой единую поверхность, в дальнейшем это объединение будем называть “зеркалом”). Таким образом, для расчета макропористости необходимо решать задачу возникновения и движения зеркал расплава.

Перемещение зеркал обусловлено объемной усадкой, а их возникновение происходит из-за формирования при затвердевании изолированных друг от друга объемов, а также из-за возникающей изоляции от внешней “подпитки”, что характерно для специальных способов литья типа ЛНД. Другими словами, область формирования макропористости – это суммарный объем, который занимают все зеркала в процессе своего движения, законы движения и возникновения которых будут рассмотрены ниже.

В зависимости от доли жидкого металла и “структурированности” той области, которая находится выше зеркала, пористость образуется либо по принципу “вытекания” жидкого металла, либо по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. В тех областях, где происходит “вытекание”, пористость может достичь больших значений – вплоть до 100%, то есть образовывать раковину. Такая модель – классическая для образования раковины [6-8]. В описанной выше модификации эта модель лишь более подробно рассматривает двухфазную область, предполагая, что между жидкой и твердой фазами есть промежуточные состояния, в которых поведение металла зависит от его “структурированности”, что и позволяет применить ее для образования рыхлости (макропористости).

Микропористость образуется при недостатке давления ниже зеркала (то есть в области потенциально достаточного питания). Давление в глубине зоны с формально хорошими условиями питания падает из-за суммарной объемной усадки, фильтрационного (затрудненного) характера движения жидкой части металла в двухфазной зоне, изоляции от внешнего давления при формировании твердой фазы на границах приложения давления, где внешнее давление – атмосферное – для обычных способов литья и повышенное или пониженное – для специальных [10].

Наиболее адекватное описание распределения давления, видимо, дает решение дифференциального уравнения фильтрационного течения [10] (не путать с законом Дарси). При падении давления ниже некоторого критического значения p_0 возникают условия для появления поверхности раздела и формирования “зародыша” микропоры, который далее будет расти в соответствии с объемной усадкой. Очевидно, что окончательный объем микропоры будет равен объемной усадке оставшейся жидкой части, то есть пористость формируется по принципу усадки при полном отсутствии компенсации. Значение такой пористости не может быть больше значения суммарной объемной усадки.

Под критическим давлением p_0 можно подразумевать разные величины. С одной стороны, можно считать, что это парциальное давление растворен-

ных газов. Тогда, при падении давления ниже p_0 газ выделяется в виде газового пузырька, что соответствует, например, водородной пористости в Al-сплавах. С другой стороны, можно принять, что критическое давление – это эффективная прочность жидкого расплава на разрыв, тогда образование пористости формально не связано с газовыделением, и вопрос о том, что в порах – вакуум или газ, остается открытым.

Описанная модель образования микропористости фактически универсальна, и ее можно успешно использовать при разных представлениях о потенциальных причинах формирования микропористости. Таким образом, эту модель в определенной степени также можно считать классической [9,11,12].

Различия в ее изложении у разных авторов заключаются в том, насколько адекватные решения предложены для определения поля давлений и какой параметр выбирают в качестве критической величины. Эти представления в программном виде на базе решения уравнения фильтрационного течения с помощью МКЭ (то есть с достаточной адекватностью) вероятно, впервые реализованы в работе [10].

Выбранный авторами метод (МКЭ) подтверждает, что в пакете влияние гидродинамического фактора незначительно, т.к. МКЭ не предназначен для решения отрывных течений, часто наблюдаемых в отливаемых в изложницу слитках.

Следует отметить, что реально помимо двух описанных выше механизмов, вероятно, действуют и некоторые промежуточные. Однако попытки не дополнить, а заменить ими описанные выше два механизма неизбежно приведут к потере универсальности модели и адекватности решения. Именно такие “промежуточные” модели в настоящее время применяют в большинстве САМ ЛП. По нашим сведениям, в полной мере моделирование микро- и макропористости не реализовано ни в одной известной САМ ЛП (включая ProCAST, MagmaSoft и другие менее популярные) кроме САМ “Полигон”. Объяснения такой ситуации найти сложно, так как описанные механизмы неоднократно обсуждали в отечественных публикациях [7-12].

В настоящее время для разработки литейных технологий нередко применяют различные системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП). Эти системы используют различные численные методы, математические алгоритмы и физические модели, имеющие разную адекватность решения. Однако, зачастую даже специалисты по различным аспектам моделирования очень поверхностно представляют себе особенности физики ЛП и связанную с этим специфику различных численных методов. Можно встретить публикации, где авторы, претендующие на знание основ моделирования ЛП, распространяют странные и даже ложные представления о численных методах и особенностях физики ЛП. Это затрудняет пользователям выбор и эффективное использование СКМ ЛП с учетом их специфики.

Большинство ЛП так или иначе определяется тепловыми процессами. Основными особенностями тепловой задачи в литейной постановке является неравномерное тепловыделение в интервале затвердевания и условия теплопередачи между отливкой и формой [3].

Выделение скрытой теплоты (нарастание доли твердой фазы) удобно учитывать с помощью т.н. «спектра тепловыделения», регламентирующего связь температуры и доли твердой фазы (рис.1.1). Для ряда сплавов спектр тепловыделения и суммарная величина скрытой теплоты являются достаточно консервативными и мало зависят от скоростей охлаждения (рис.1.2).

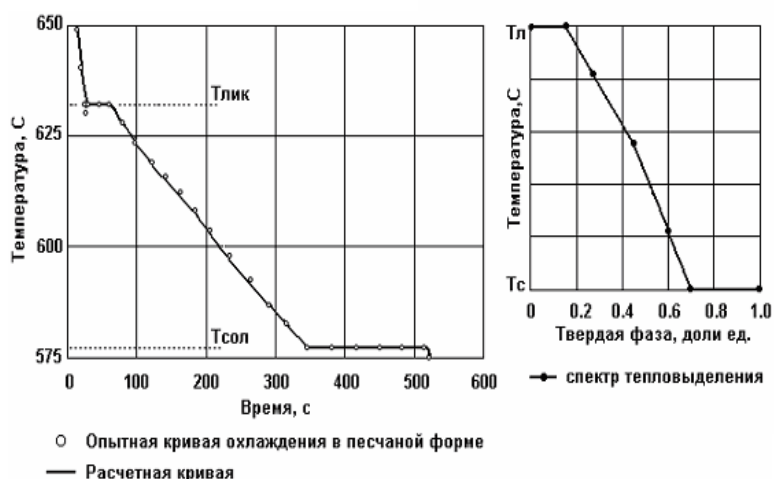


Рис.1.1. Кривые охлаждения для центра слитка \varnothing 45мм из сплава Al-5%Si, заливаемого в песчаную форму и спектр тепловыделения



Рис.1.2. Кривые охлаждения для центра слитка \varnothing 55мм из сплава Al-5%Si, заливаемого в кокиль

При любой модели расчета тепловыделений можно ввести скрытую теплоту и спектр тепловыделения в исходное уравнение нестационарной теплопроводности т.н. «двухэтапным энтальпийным методом» [3]. Полагая для простоты теплоемкость сплава C_p постоянной на некотором температурном интервале ΔT , а суммарную скрытую теплоту L постоянной для сплава, мож-

но записать уравнение, связывающее изменение энтальпии ΔH с изменением температуры ΔT и изменением доли твердой фазы $\Delta \xi$:

$$\Delta H = C_p \cdot \Delta T - L \cdot \Delta \xi, \quad (1.1)$$

Т.е. вычисляются энтальпийные поля, которые определяются одновременно температурой и долей жидкой (твердой) фазы [3]. Причем, для большинства литейных задач, наиболее интересно распределение полей жидких фаз, т.к. именно они, а не температурные поля регламентируют большинство процессов в интервале затвердевания [4].

Известна компьютерная система моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья, созданная в лаборатории математического моделирования Удмурдского Государственного Университета г. Ижевск – LVMFlow.

В основу новой версии LVMFlow v3 положен метод контролируемого объема Control Volume (CVM). CVM предполагает точный учет балансовых условий, в результате чего разностная сетка дополняется набором геометрических характеристик, описывающих истинный объем материала в ячейке сетки, который не равен объему просто кубика (как было в конечных разностях) и площади соприкасающихся материалов в каждой ячейке.

За счет введения более плавной (по сравнению с методом конечных элементов) границы, учитывающей геометрию отливки, решается проблема с постановкой граничных условий в гидродинамике и расчете напряжений.

Хотя для тепловой задачи наличие такой плавной границы не является существенным условием, в задачах гидродинамики и расчета напряжений она приводит к более устойчивым численным расчетам, позволяя тем самым получать решение за меньшее время.

Переход к CVM сохранил общую структуру уравнений и позволил использовать алгоритмы численного и физического расщепления для уравнений тепломассопереноса, что в итоге сохранило быстродействие на уровне близком к конечным разностям, при одинаковом разбиении.

Наличие CVM позволило решить задачу более точного отслеживания распространения фронта затвердевания в отливке, а значит более точного прогнозирования поведения дефектов.

Более точный учет геометрии в рамках CVM позволил отслеживать поведение свободной поверхности при заливке, в частности, решить вопрос с образованием пузырей и твердых включений.

Программа позволяет промоделировать следующие процессы:

- заполнение формы металлом;
- расчет температурных полей;
- расчет поля жидкой фазы;
- расчет сегрегации (химическая неоднородность);
- расчет дефектов;
- расчет напряжений и деформаций;
- каналы охлаждения;

- работа фильтров;
- учет многократного использования формы.

Совместная работа с предприятиями городов Заволжья, Новокраматорска, Новосибирска, Красноярска, Ижевска, Нижнего Новгорода, Златоуста, позволила создать систему применимую к большому спектру литейных технологий. В результате сотрудничества со шведской фирмой NOVACAST AB система была доведена до уровня требований мирового рынка. Достоверные результаты моделирования, их наглядное представление, широкие возможности, удобный интерфейс и разумная цена привели к определенному коммерческому успеху за рубежом (с 1993 сделано более 200 установок в США, Канаде, Бразилии, Швеции, Норвегии, Австралии, Турции). На зарубежном рынке система распространяется под торговыми марками NovaSolid и NovaFlow.

Недостаток перечисленных программ в том, что они не учитывают процессы гидродинамики, которые, особенно в крупных слитках, могут привести к диффузному разливаемому металлу в стенки изложницы. Кроме того, в период затвердевания интенсивные гидродинамические потоки приводят к искажению фронта затвердевания, и его продвижение становится не перпендикулярным стенкам изложницы, а под определенным углом. Это объясняется тем, что вынесенный восходящими потоками из центра расплава горячий металл подплавляет твердую корочку в верхней части изложницы. Опускаясь вниз, поток металла охлаждается и способствует интенсивному нарастанию твердой корочки.

Таким образом, чем интенсивней перемешивание расплава, тем более интенсивно растет твердая корочка в нижней части изложницы. К сожалению, этот чрезвычайно важный эффект, приводящий к неравномерному росту твердой корочки и неоднородности распределения термических напряжений, этим пакетом не учитывается [14].

2.2. Сравнительный анализ математического обеспечения для моделирования задач тепломассопереноса при затвердевании слитков

Следующие классификационные признаки подчеркивают специфику отдельных систем автоматизированного моделирования [15] (табл.2.1):

Таблица 2.1. Специфика отдельных систем автоматизированного моделирования

Наименование	Назначение		Уровень функциональных возможностей		Методы решения уравнений математической физики			Ориентация на моделирование	
	Специальное	Общее	Средний	Высокий	Конечные разности (КР)	Конечные элементы (КЭ)	Конечные объемы (КО)	Отдельных физических процессов	Вариантов литейной технологии в целом
WinCast (ФРГ) [16]	+		+			+		+	

MAGMASoft (ФРГ) [19]	+			+	+				+
ProCast (США, Швейцария) [20]	+			+		+		+	
Poligon (Россия) [17]	+		+			+		+	
LVMFlow (Россия) [18]	+		+		+			+	
FLOW-3D (США) [21]		+		+			+	+	

Кроме того, существуют и вычислительные пакеты общего профиля, которые в том числе позволяют моделировать процессы переноса, – такие как ANSYS и COMSOL Multiphysics.

Наибольшее распространение в литейном производстве получили численные методы конечных разностей (КР) и конечных элементов (КЭ). Каждому методу присущи свои преимущества и недостатки. Так, для КР простота построения расчетной сетки связана с низкой точностью представления поверхностей в системе «отливка-форма». В КЭ, наоборот, сетка с высокой точностью адаптируется к особенностям геометрии, но трудоемкость ее создания и требования к геометрии существенно более высокие. Разрешающая способность методов также не совпадает, при требовании равной вычислительной точности размер дискретной модели в КЭ существенно ниже, чем в КР. Это означает, что метод КЭ требует меньших вычислительных ресурсов и расчетного времени, чем КР.

Существует класс задач, где получить решение при условии ограниченных вычислительных ресурсов и расчетного времени (условия конструкторских и технологических отделов на производствах – персональные компьютеры и работа в режиме реального времени) при использовании КР и КЭ или затруднительно, или вовсе невозможно. Это, например, задачи со сложной, тонкостенной геометрией. КР дают слишком большие дискретные модели, расчет по которым может длиться неделями, а КЭ требуют сопоставимого времени только на построение расчетной сетки. В рамках методов КЭ и КР ситуация может оказаться безвыходной. Выход – использование другого численного метода – метода конечных объемов (КО), реализованного на структурированной сетке. Метод КО получает все большее распространение в литейном производстве, он объединяет преимущества методов КР и КЭ при одновременном исключении их недостатков. Так, простота генерации расчетной сетки, характерная для КР, совмещена с высокой точностью представления геометрии, сопоставимой с точностью КЭ. Кроме этого, метод КО имеет ряд других преимуществ. Тенденция ближайшего времени – переход с метода КР на метод КО. Работы по переводу КР пакетов (MAGMASoft, LVMFlow) на метод КО уже ведутся.

Некоторые задачи, например, расчет температурных полей в системе «отливка-форма», в САМ ЛП давно и успешно решаются. Некоторые задачи (кинетика кристаллизации, оптимизация и др.) только сейчас начинают внед-

ряться. Другие, будучи внедрены ранее (гидродинамика, напряженно-деформированное состояние), имеют высокий потенциал развития из-за сложности самой задачи, недостатка знаний об определенных свойствах материалов и высоких требований к вычислительным системам. В этих направлениях идет наиболее интенсивное развитие САМ ЛП. Перечислим эти направления.

Гидродинамика. Показательным является пример литья под давлением. Сложность моделирования этого технологического процесса обусловлена необходимостью учета большого числа факторов, определяющих характер процесса, а именно: газовой фазы и ее влияния на движение расплава, твердого состояния сплава, турбулентности, диспергирования потока, вентилиции пресс-формы во время заполнения ее расплавом, возможного кавитационного режима течения. На таком уровне процесс заливки рассматривается только во FLOW-3D. Одним из направлений развития гидродинамических решателей является расчет взаимодействия потока с подвижными твердыми телами. Это позволяет моделировать, например, процесс литья под давлением в целом, включая взаимодействие расплава с пресс-поршнем в пресс-цилиндре или отслеживать состояние расплава (термическое, химическое) начиная с плавильной печи, перелива его в разливочный ковш, транспортировки к литейной форме, заливки и далее до конца техпроцесса.

Кристаллизация. Хорошо известно, что служебные свойства литого изделия определяются характеристиками его макроскопического кристаллического строения – числом кристаллов, их формой и размерами, а также микроструктурными параметрами кристаллов – дендритным параметром. Для определения этих характеристик процесс затвердевания отливки необходимо рассматривать на уровне кинетики кристаллизации, которая учитывает процессы зарождения, роста и столкновения кристаллов. ProCAST – первый коммерческий пакет, в котором такая возможность была реализована. Использован оригинальный подход, состоящий в применении теории клеточного автомата к процессу коллективного роста кристаллов в отливке[22]. Возможности подобного моделирования позволяют учитывать влияние на процесс кристаллизации химической неоднородности и конвективного перемешивания расплава в двухфазной зоне. Следующий шаг в развитии данного направления – расчет морфологического строения отдельных однофазных и эвтектических кристаллов. Хорошие результаты получены при использовании метода фазовых полей.

Оптимизация. Накоплен большой опыт решения так называемых «прямых» задач или задач анализа литейной технологии. САМ ЛП помогают технологу понять, что произойдет с отливкой при определенных условиях ее изготовления. Получить ответы на следующие вопросы: какие будут температурные поля в отливке, возникнут ли и в каком месте термические узлы, выполняется ли и в какой степени принцип направленности затвердевания, какие литейные дефекты возникнут, и каково будет их распределение в теле

отливки при определенной температуре заливки, типе и размерах литниково-питающей системы и т.д.? Однако, технологу требуется определить не термические узлы или какие-либо дефекты в отливке, а на основе заданного уровня качества и себестоимости отливки, определить условия ее изготовления или ее конфигурацию, то есть технологу необходимо решить не прямую, а обратную задачу (не задачу анализа, а задачу синтеза). Обратная задача может быть сформулирована как задача параметрической оптимизации, с заданием целевой функции и параметров оптимизации. Задача оптимизации состоит в решении определенного числа прямых задач и нахождении такой комбинации оптимизационных параметров, которые удовлетворяют целевой функции. Первой САМ ЛП, в которой была реализована эта возможность – SolidCAST.

Развитие этого направления идет путем встраивания в САМ ЛП (MAGMASoft, ProCAST) универсальных оптимизаторов практически не ограниченных по области применения. Единственное ограничение – лишь в возможности сформулировать ту или иную технологическую задачу как задачу оптимизации. Молодое и бурно развивающееся направление – топологическая оптимизация. Параметром оптимизации здесь является топология отливки, а целевой функцией – масса, себестоимость или технологичность ее изготовления.

Кратко рассмотрим использование вычислительных пакетов общего профиля для моделирования процессов переноса.

ANSYS представляет собой конечно-элементный пакет, включающий в себя целое семейство специализированных подсистем для решения в единой среде широкого спектра инженерных задач[23].

Решать задачи теплообмена позволяют компоненты ANSYS/Multi physics, ANSYS/Mechanical, ANSYS/Professional и ANSYS /FLOTRAN. Основой теплового анализа в ANSYS является уравнение теплового баланса, основанное на законе сохранения энергии.

Конечно-элементное решение, получаемое с помощью ANSYSa, определяет температуры в узлах, которые затем используются для получения других тепловых величин.

Программа ANSYS позволяет рассчитывать все три вида теплообмена: теплопроводность, конвекцию и лучистый теплообмен.

ANSYS поддерживает два типа теплового анализа: стационарный и нестационарный.

Программы ANSYS и ANSYS/Professional включают около 40 элементов для решения стационарных задач. Главное различие между ними состоит в том, что большинство граничных условий в нестационарных задачах являются функцией времени. При определении зависимых от времени граничных условий можно использовать или функциональную зависимость, или представить эту зависимость в виде кривой, или разделить эту кривую на шаги «нагружения».

Анализ фазовых превращений представляет собой особый вид теплового нестационарного анализа, при котором моделируется затвердевание или расплавление материала в процесса теплообмена. При фазовом анализе требуется учитывать энергию (скрытую теплоту), которая выделяется или поглощается при фазовых превращениях. В программе ANSYS это осуществляется заданием энтальпии материала как функции температуры.

В программе ANSYS для выполнения фазового анализа используются такие же расчетные средства, как и для других видов нестационарного теплообмена. Для постпроцессорной обработки доступны результаты решения в виде температуры и плотности теплового потока в узлах. Кроме того, можно получить границу раздела “твердая фаза – жидкая фаза” за счет сужения значений разделяемых температур в области фазового перехода.

Возможность решать задачи гидроаэродинамики достигается либо за счет объединения модуля ANSYS/FLOTRAN, либо с помощью программы ANSYS/Multiphysics. Компоненты скорости, значения давления и температуры определяются на основе законов сохранения массы, количества движения и энергии. Для моделирования турбулентного движения имеется возможность использовать описание явления с помощью уравнений неразрывности и импульса. В качестве производных результатов вычисляются следующие параметры: коэффициент давления, общее давление и функции потока для движущейся среды, а также тепловой поток и коэффициент поверхностной теплоотдачи для задач тепломассопереноса. Доступны следующие виды гидродинамического анализа: ламинарное течение, турбулентное течение, теплообмен в потоке. Для проведения гидродинамического анализа в модуле ANSYS/FLOTRAN используются четыре различных решателя. Метод обусловленных сопряженных градиентов применяется для решения уравнения давления в задачах движения несжимаемых сплошных сред. Метод сопряженных остаточных членов, при наличии или отсутствии обусловленности, обеспечивает решение таких несимметричных систем, как уравнение энергии, уравнение давления для сжимаемых сред или уравнения переноса для многокомпонентных смесей. Трехдиагональный матричный алгоритм (TDMA) можно использовать для эффективного приближенного решения любых систем уравнений. Для решения наиболее сложных несимметричных матричных систем, имеющих место в связанных задачах теплопереноса, используется метод обусловленного обобщенного минимума остаточных членов. Вязкость жидкости учитывается моделями Бингама, Карро или моделью с вязкостью, меняющейся по степенному закону. Кроме того, есть возможность применить модель вязкого поведения жидкости, заданную пользователем.

Сосуществование конечных элементов программы ANSYS и модуля FLOTRAN в одной базе данных дает пользователю возможность выполнить последовательный анализ связанных задач. Это также позволяет решать задачи индукционного перемешивания и вычисления напряжений в процессе тепломассопереноса. Наличие элементов для гидроаэродинамического ана-

лиза дает возможность выполнить вслед за таким анализом прочностной или тепловой расчет. Сначала можно найти характеристики конвективного поведения среды, а затем выполнить подробный тепловой анализ конструкции, используя результаты предыдущего анализа в качестве граничных условий. Пользователи программы ANSYS имеют возможность учесть наличие магнитных сил Лоренца и джоулева тепла в расчете параметров движения сплошной среды.

COMSOL Multiphysics – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов[24]. Расчет не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи и т.п.

Для решения задач тепломассопереноса предусмотрены три основных физических раздела Heat Transfer [Теплоперенос], Diffusion [Диффузия] и, в составе мультифизической модели, Fluid Dynamics [Гидродинамика]. Раздел Fluid Dynamics использует уравнение Навье-Стокса для несжимаемой жидкости. Раздел Heat Transfer включает в себя, кроме подраздела Conduction [Кондукция], подраздел Convection and Conduction [Конвекция и кондукция], который отличается тем, что кроме теплофизических свойств, можно задать поле скоростей теплоносителя. Раздел Diffusion тоже состоит из двух подразделов: Diffusion [Диффузия] и Convection and Diffusion [Конвекция и диффузия]. Один из модулей расширения General Heat Transfer [Общий теплоперенос] включает в себя объединенные с излучением, конвекцию и кондукцию, а так же такие разделы как Thin Conductive Layer – тонкий теплопроводный слой, Non-Isothermal Flow – неизотермический поток.

Таким образом, мы убедились, что существует достаточное количество расчетных пакетов, позволяющих учитывать процессы переноса и которые можно использовать для моделирования тепломассопереноса в затвердевающем слитке. Однако все описанные системы основаны на определенных шаблонах для моделирования и очень небольшое количество классов задач может похвастаться тем, что хорошо отработаны как разные варианты их постановки, так и методы расчета. Использование универсальных расчетных пакетов также не всегда оправдано, т.к. сложно представить, что среднестатистический инженер будет настолько хорошо подготовлен в вузе и успеет накопить опыт для решения сложнейших задач гидродинамики, где даже у профессионалов инженерного анализа интуиция нарабатывается годами. А сколько времени надо будет потратить на исследования новой области и построение расчетных моделей различной сложности, чтобы подготовить шаблоны для моделирования и на их основе сделать массовый инструмент под конструктора-универсала?

Таким образом, остаются востребованными программы, разработанные с помощью традиционных средств программирования, которые обладают удобным для конечного пользователя интерфейсом и не требовательны к ресурсам компьютера. При этом это программное обеспечение для своей работы не требует установки дополнительного программного окружения и может являться составной частью информационной системы предприятия.

Также необходима разработка библиотек-конструкторов, которые позволяют «собрать» пакет прикладных программ в максимально короткие сроки, имеющие удобные и понятные разработчику рекомендации и не требующих углубленных знаний в области программирования.

Для создания подобных расчетных программ тепломассопереноса и за- твердевания разработан инструмент, который может модифицироваться и для других видов математических задач [25].

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Недопьокін Ф.В. Твердіння металів і металевих композицій / Ф.В.Недопьокін, В.М.Кондратенко, В.В.Білоусов і др. // Підручник для ВНЗ під грифом МОН України. Видання друге, доопрацьоване. – Київ: Наукова думка НАН України, 2009. – 448 с.
2. Баст Ю. Использование системы компьютерного моделирования литейных процессов «ПОЛИГОН» для исследования поля температур алюминиевых сплавов / Ю.Баст, Ю.В.Котова, М.Айцурадзе // Вестник ПГТУ, Машиностроение, материаловедение, № 3(10) 2007. – С. 139-144.
3. Тихомиров М.Д. (ЦНИИМ, Санкт-Петербург). (Приложение к журналу «Литейное производство», № 12, 2001, с.8-14).
4. Тихомиров М.Д. Особенности постановки задач при моделировании литейных процессов / М.Д.Тихомиров // Численные методы. Преимущества и недостатки. Сб. Компьютерный анализ литейной технологии: проблемы и перспективы. Материалы семинара 15-19 октября 2007. г. – СПб.: ЦНТИ «Прогресс», 2007. – С.20-29.
5. Тихомиров М.Д. Модели литейных процессов в САМ ЛП “Полигон” / М.Д.Тихомиров // Литейные материалы, технология, оборудование. – Сб. науч. тр. ЦНИИМ, вып. 1. – С.-Петербург, 1995. – С.21-26.
6. Нехендзи Ю.А. Стальное литье / Ю.А.Нехендзи. – М., Metallurgizdat, 1948. – 787с.
7. Гуляев Б.Б. Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б.Гуляев– М., Metallurgizdat, 1950. – 227 с.
8. Голод В.М. Проблема оптимизации питания отливок/ В.М.Голод // Теплофизика процессов затвердевания стали.– Сб. науч. тр. ИПЛ АН СССР. – К., 1979. – С.139-153.
9. Борисов Г.П. Давление в управлении литейными процессами. / Борисов Г.П. – К., Наукова думка, 1988.-272 с.
- 10.Котлярский Ф.М. Формирование отливок из алюминиевых сплавов / Ф.М.Котлярский. – К., Наукова думка, 1990. – 230 с.
- 11.Койнов И.Л. Компьютерное исследование процессов питания в отливках из алюминиевых сплавов при литье в кокиль и песчаные формы / И.Л.Койнов // Кристаллизация и компьютерные модели. Сб. науч. тр.-Ижевск, УдГУ, 1991. – С.115-124.
- 12.Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л.Сегерлинд // Пер. с англ. – М., Мир, 1979. – 392 с.
- 13.Тихомиров М.Д. Сравнение тепловых задач в системах моделирования литейных процессов Полигон и ProCAST / М.Д.Тихомиров // Компьютерное моделирование литейных процессов. Сб. науч. тр. ЦНИИМ, вып. 2. – С.-Петербург, 1996. – С.22-37.
- 14.Гиршович Н.Г. Чугунное литье / Н.Г.Гиршович. – М.: Metallurgizdat, 1949. – 370с.

15. Вольнов И.Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы / И.Н.Вольнов // Литейщик России №6/2007. – С.14-17.
16. <http://www.simtec-inc.com/>
17. <http://poligonsoft.ru/>
18. <http://lvmflow.ru/>
19. <http://www.magmasoft.com/>
20. <http://www.procastparts.com/>
21. <http://www.flow3d.com/>
22. фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов / фон Нейман Дж. – М.: Мир, 1971.
23. Югов В.П. Решение задач теплообмена. ANSYS 5.7 Thermal Analysis Guide / В.П.Югов. – Перевод. – Москва: KAD-FEM GmbH, 2001. – 110 с.
24. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL / FEMLAB / Г.В.Бирюлин. – СПб: ГУИТМО, 2006. – 77 с.
25. Программная система для моделирования задач тепломассопереноса / В.И. Бондаренко // Вестник Донецкого университета. Серия А. Естественные науки, №2/2009. – С.103-111

3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ МОДЕЛИ- РОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В данной главе описывается метод проектирования программного обеспечения, разработанный для моделирования задач тепломассопереноса при разливке и формирования стальных слитков, но который может быть при необходимости модифицироваться и для других видов математических задач. Результатом работы для разработчика можно считать компиляцию исполнимых файлов для расчета какой-либо конкретной задачи тепломассопереноса. В дальнейшем полученный пакет программ можно как поставлять конечным пользователям (например, заказчикам на металлургическом производстве или в другой отрасли производства или науки), так и самостоятельно использовать для расчетов.

3.1. Автоматизация проектирования программного обеспечения

При проектировании описываемой системы ставится двойная цель: удобство и простота пользования расчетной программой для конечного пользователя и максимальная эффективность для разработчика математической модели. Для этого представляется логичным разделить непосредственно расчет задачи и интерфейсную часть программы, а также из расчета выделить некую абстрактную общую для всех задач тепломассопереноса и затвердевания часть и составляющую, относящуюся только к решению текущей конкретной задачи. При этом получаем следующие преимущества:

- Разработчик может сосредоточиться только на разработке математической модели, что экономит время на создание программы.
- Общую расчетную и интерфейсную часть можно реализовать в виде отдельных динамических библиотек, что сэкономит оперативную и дисковую память компьютера.
- Независимые интерфейсные библиотеки можно совершенствовать, не переписывая расчетное ядро.
- Оставляя неизменной интерфейсную часть, можно варьировать в самых широких пределах математическую модель, на которой основано вычислительное ядро.

Основные этапы предлагаемой информационной технологии представлены в таблице 1.

Таблица 1. Информационная технология (основные этапы)

Операции	Результат	Средства ИТ	
		Модели, методы	Средства

Формирование геометрии слитка и расчетной области по чертежной документации заказчика.	Геометрия расчетной области.	Методы агрегирования, фиктивных областей и ступенчатой аппроксимации.	Разработанное ПО «Область»
Формирование математической модели.	Подпрограммы расчета.	Неявная монотонная конечно-разностная схема с привлечением методов интегро-интерполяционного, «возмущенного» оператора, разности против потока и прогонки. Алгоритм обобщенной математической модели.	Разработанный модуль математической модели.
Инкапсуляция действий по расчету.	Класс «Задача»	Методы объектно-ориентированного программирования. Алгоритм проведения расчета.	Средства разработки ПО
Преобразование данных математической модели для использования в методах класса «Задача».	Операторы преобразования типов данных для сопряжения пары объектов.	Метод модульного программирования. Использование процедурных и функциональных типов и переменных.	Специальный модуль-посредник.
Подготовка к выполнению моделирования конечным пользователем.	Пользовательский интерфейс, графическая визуализация процесса расчета и массивов данных.	Методы объектно-ориентированного программирования. Методология Human-Computer Interaction (HCI).	Компоненты разработанной графической подсистемы.

Реализовывать вышесказанное предлагается в виде использования независимых программных модулей:

- непосредственного расчета математической модели задачи;
- абстрактной (общей) задачи;
- модуль, который осуществляет связь между двумя первыми;
- интерфейсные модули, отвечающие за ввод-вывод данных и взаимодействие с пользователем.

Взаимодействие между модулями показано на рис.3.1.

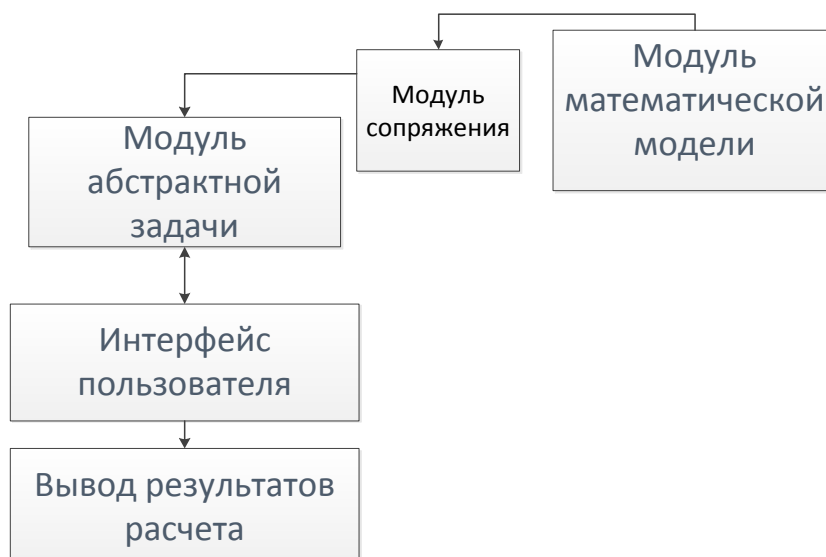


Рис.3.1. Взаимодействие программных модулей

При этом процесс расчета можно представить как отдельный объект, который может создаваться (выделять для себя оперативную память), уничтожаться (освобождать память), записывать свое состояние на диск и считывать его и выполнять собственно расчет задачи. Отсюда следует логичность применения объектно-ориентированного подхода.

В настоящее время можно выделить три наиболее развитых и распространенных объектно-ориентированных языка программирования: Java, C++ и Delphi (Object Pascal) [3.8]. Проведем небольшое сравнение с целью выбрать из них наиболее подходящий для описываемых вычислительных задач.

Языки программирования можно оценить по тому, насколько они строгие к типам. Контроль типов включает проверку существования вызываемых методов, типов их параметров, проверку границ массивов и т.д. C++, java, и object pascal предпочитают более или менее широкий контроль во время компиляции. C++, возможно, наименее точен в этом отношении, тогда как java использует проверку типов наиболее широко. Тот факт, что виртуальная машина java интерпретирует байтовый код во время выполнения, не означает, что этот язык отказывается от проверки типов во время компиляции. Наоборот, в этом языке проверка наиболее тщательна.

Ещё одно различие лежит между чистыми и гибридными объектно-ориентированными языками. Среди трех сравниваемых языков только java является чистым ОО языком. На первый взгляд, это кажется положительной идеей. Однако она ведет к тому, что приходится использовать множество статических методов и статических данных, что не так уж отличается от использования глобальных функций и данных за исключением более сложного синтаксиса. C++ и Delphi, наоборот, – типичные примеры гибридных языков, которые позволяют программистам использовать при необходимости традиционный подход с или pascal. Этот подход делает более простым написание расчетных подпрограмм и позволяет без особых усилий использовать их повторно в других проектах.

Третий элемент, по которому различаются языки ООП – их объектная модель. Некоторые традиционные языки ООП позволяют программистам создавать объекты в стеке, в куче (в хипе – heap) или в статической памяти. В этих языках переменная типа класс соответствует объекту в памяти. Так работает C++.

В ссылочно-объектной модели каждый объект динамически размещается в куче, а переменная типа класс фактически является ссылкой или хэндлом объекта в памяти (технически это нечто вроде указателя). Java и Delphi используют эту ссылочную модель. Вкратце это значит, что необходимо не забывать выделять и освобождать память для объекта. Может показаться, что ссылочно-объектная модель требует большей работы от программиста. Но при этом следует обратить внимание на то, что в с++ необходимо часто использовать указатели и ссылки на объекты. Только используя указатели и ссылки, можно добиться полиморфизма. Ссылочно-объектная модель, наоборот, делает использование указателей подразумеваемым, скрывая от программиста сложность этого подхода. В java, в частности, официально указателей нет, хотя они там повсюду. Только программисты не имеют над ними прямого контроля, и поэтому, из соображений безопасности, не могут попасть в произвольное место памяти.

После использования объекта нужно уничтожить его, чтобы не занимать неиспользуемую память. В с++ уничтожить объект, расположенный в стеке, довольно просто. С другой стороны, уничтожение объектов, созданных динамически, зачастую является сложной проблемой. Есть много решений, включая подсчет ссылок и "интеллектуальные" указатели, но ни один из них не даёт простого решения. Это не касается java, так как виртуальная машина запускает алгоритм сборки мусора (в фоновом процессе, согласно теории java; или начинает этот процесс после того, как ненадолго остановит программу, как в большинстве реальных jvm). Сбор мусора предоставляется программистам бесплатно, но он может неблагоприятно влиять на эффективность выполнения приложения. Отсутствие явно записываемых деструкторов может приводить к ошибкам в завершающем коде. В object pascal, наоборот, нет механизма сбора мусора. Однако компоненты delphi поддерживают идею владельца (owner) объекта: владелец становится ответственным за уничтожение всех объектов, которыми он владеет. Это делает управление уничтожением объекта очень простым и прямым. Delphi также использует механизм подсчёта ссылок для строк, динамических массивов и интерфейсов, освобождая объект в памяти, когда него нет больше ссылок.

Важное различие между тремя языками заключается в организации исходного кода в файлах. Все три языка используют файлы в качестве стандартного механизма для запоминания исходного кода классов, но компилятор с++, в отличие от delphi или java, не понимает файлов. Эти же два языка работают с идеей модулей, хотя называют их по-разному.

В с++ программист обычно помещает определение класса в файл объявлений, а определение методов – в отдельный файл кода. Обычно у этих двух файлов одинаковые имена и различные расширения. Компилируемый блок, как правило, ссылается (включает в себя) на свой файл объявлений и на файлы объявлений тех классов (или функций), на которые ссылается код. Это значит, что линкеру предстоит большая работа, потому что компилятор не может знать, в каком другом модуле может быть определен нужный метод.

В object pascal каждый файл исходного кода называется unit, и он делится на две части: интерфейс и исполнение, отмечаемые соответственно ключевыми словами interface и implementation. Секция интерфейса включает в себя определения классов (с объявлениями методов), а секция исполнения должна включать в себя определения методов, объявленных в интерфейсе. Писать фактический код в секции интерфейса нельзя. Можно сослаться на объявления другого файла, используя предложение uses. Этим включается в компиляцию интерфейс того файла. Сборка программы обычно происходит в несколько раз быстрее, чем на С++.

В java каждый файл исходного кода или единица компиляции компилируется отдельно. Затем можно отметить группу единиц компиляции как части одного пакета. В отличие от двух других языков, весь код методов пишется тут же при объявлении класса. При включении какого-либо файла предложением import, компилятор читает только public объявления, а не весь код.

Другим важным отличием java и delphi является их способность читать откомпилированные файлы и извлекать из них определения, как бы извлекая заголовки из скомпилированного кода. С другой стороны, для преодоления отсутствия модулей с++ включает пространство имен (namespace). В java и delphi, когда два имени конфликтуют, можно использовать имя модуля в качестве префикса. Это не требует дополнительной работы по определению пространств имен, а просто включено в языки.

Объектно-ориентированные языки обычно разрешают заводить методы и данные, относящиеся к классу целиком, а не к отдельным объектам. Метод класса обычно может быть вызван как для объекта класса, так и применён к классу в целом. Данные класса не повторяются для каждого объекта, а разделяются между всеми объектами данного типа.

В с++ методы и данные класса отмечаются ключевым словом static. Данные класса должны быть проинициализированы специальным объявлением, ещё одной уступкой отсутствию модулей. В delphi допустимы только методы класса, которые отмечаются словом class. Данные класса можно заменить приватными глобальными переменными в секции исполнения юнита, описывающего класс. Java использует то же слово, что и с++, – static. Статические методы используются очень часто (и даже слишком) из-за отсутствия глобальных функций. Статические данные можно инициализировать прямо в объявлении класса.

В некоторых ОО языках каждый класс происходит от некоторого базового класса по умолчанию. Этот класс, часто называемый object, обладает

некоторыми основными способностями, доступными всем классам. Фактически, все другие классы в обязательном порядке ему наследуют. Хотя язык `c++` и не поддерживает такое свойство, многие структуры приложений базируются на нём, вводя идею общего базового класса. Пример тому – `mfc` с классом `soobject`. Каждый класс `delphi` автоматически наследует классу `tobject`. Так как язык не поддерживает множественное наследование, все классы формируют гигантское иерархическое дерево. Класс `tobject` поддерживает `rtti` и обладает некоторыми другими возможностями. Общей практикой является использование этого класса, когда нужно передать объект неизвестного типа. Как и в `delphi`, все классы `java` безоговорочно наследуют классу `object`. И в этом языке у общего класса тоже есть некоторые ограниченные свойства и небольшая поддержка `rtti`.

В строго типизированных ОО языках компилятор осуществляет весь контроль типов, так что нет особой необходимости хранить информацию о классах и типах в работающей программе. Тем не менее, есть случаи (как, например, динамическое преобразование типов), которые требуют некоторую информацию о типе. По этой причине все три языка более или менее поддерживают Идентификацию/Информацию о Типе Времени Выполнения (`rtti`). Язык `c++` первоначально не поддерживал `rtti`. Это было добавлено позже для динамического преобразования типа (`dynamic_cast`) и сделало доступной некоторую информацию о типе для классов. Можно запросить идентификацию типа для объекта, и проверить, принадлежат ли два объекта одному классу. `Object pascal` и визуальная среда поддерживает и требует много `rtti`. Доступен не только контроль соответствия и динамическое преобразование типов (с помощью операторов `is` и `as`). Классы генерируют расширенную `rtti` для своих `published` свойств, методов и полей. Фактически это ключевое слово управляет частью генерации `rtti`. Вся идея свойств, механизм потоков (файлы форм – `dfm`), и среда `delphi`, начиная с Инспектора Объектов, сильно опирается на `rtti` классов. У класса `tobject` есть (кроме прочих) методы `classname` и `classtype`. `Classtype` возвращает переменную типа класса, объект специального типа ссылки на класс (который не является самим классом). Как и в `object pascal`, в `java` тоже есть единый базовый класс, помогающий следить за информацией о классе. Безопасное преобразование типов (`type-safe downcast`) встроено и в этот язык. Метод `getClass()` возвращает своего рода метакласс (объект класса, описывающего классы), и можно применить функцию `getName()` для того, чтобы получить строку с именем класса.

Есть еще свойства, специфичные только для одного из трёх языков. Так, в `c++` есть ещё перегрузка операторов, тогда как перегрузка методов присутствует также в `java` и в `object pascal`. `C++` позволяет программистам перегружать и глобальные функции. Можно перегрузить операторы преобразования типов, написав конвертирующие методы, которые будут вызываться "за кулисами". Объектная модель `c++` требует копировать конструкторы и перегружать операторы присваивания, в чем не нуждаются остальные два

языка, поскольку базируются на ссылочно-объектной модели. Ключевое свойство java – идея переносимого байтового кода, хотя это и не относится непосредственно к языку. Другое примечательное свойство – это поддержка основанных на языке компонентов, известных как `javabeans` и многие другие свойства, добавленные в этот язык. Некоторые специфические черты `object pascal`: ссылки на классы, легкие для использования указатели на методы (основа модели обработки событий) и, в частности, свойства (`property`). Свойство – это просто имя, скрывающее путь, которым можно получить доступ к данным или методу. Свойство может проецироваться на прямое чтение или запись данных, а может ссылаться на метод, обеспечивающий доступ. Даже если поменять способ доступа к данным, при этом не нужно менять вызывающий код (хотя нужно будет его перекомпилировать). Это делает свойства очень мощным средством инкапсуляции.

Таким образом, сравнив основные характеристики, мы видим, что хотя как языки, так и их среда копируют характеристики друг друга, они были сконструированы для разных потребностей. Цель `c++` – мощь и контроль за счет сложности. Целью `delphi` является легкое, визуальное программирование (не отказываясь от мощи) и прочная связь с `windows`. Цель `java` – мобильность, даже за счет некоторого отказа от скорости, и распределённые приложения или исполняемое содержание веб-сайтов.

Поэтому в качестве основного языка программирования был принят `Delphi`. При этом не исключается применение программных вставок на языках `assembler` и `c`.

Рассмотренные ранее диаграммы (рис.3.1–3.2) отражали концептуальные аспекты построения модели системы и относились к логическому уровню представления. Рассмотрим физическое представление модели на примере проекта задачи моделирования слитков колесной стали (`sifon`).

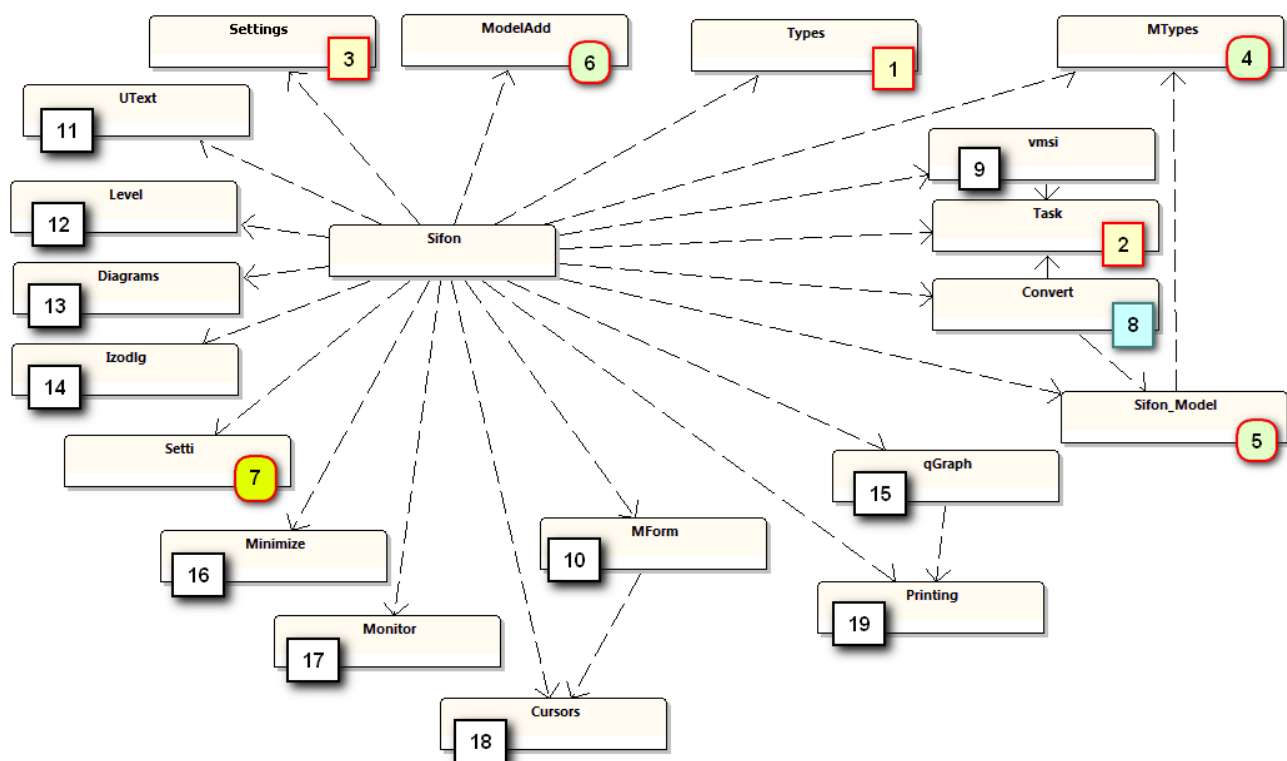


Рис.3.3. Схема взаимодействия библиотек

На рис.3.3 изображена схема взаимодействия основных библиотек, которые используются в данном проекте. Файлы, помеченные номерами от 1 до 3, относятся к программному модулю «Задача». Пометки 4-7 относятся к модулю математической модели. Файл Convert (8) содержит модуль сопряжения. Номера 9-19 принадлежат графическому интерфейсу пользователя и выводу результатов расчета.

Базовый класс «Задача».

Общая схема класса «Задача» представлена на рис.3.4.

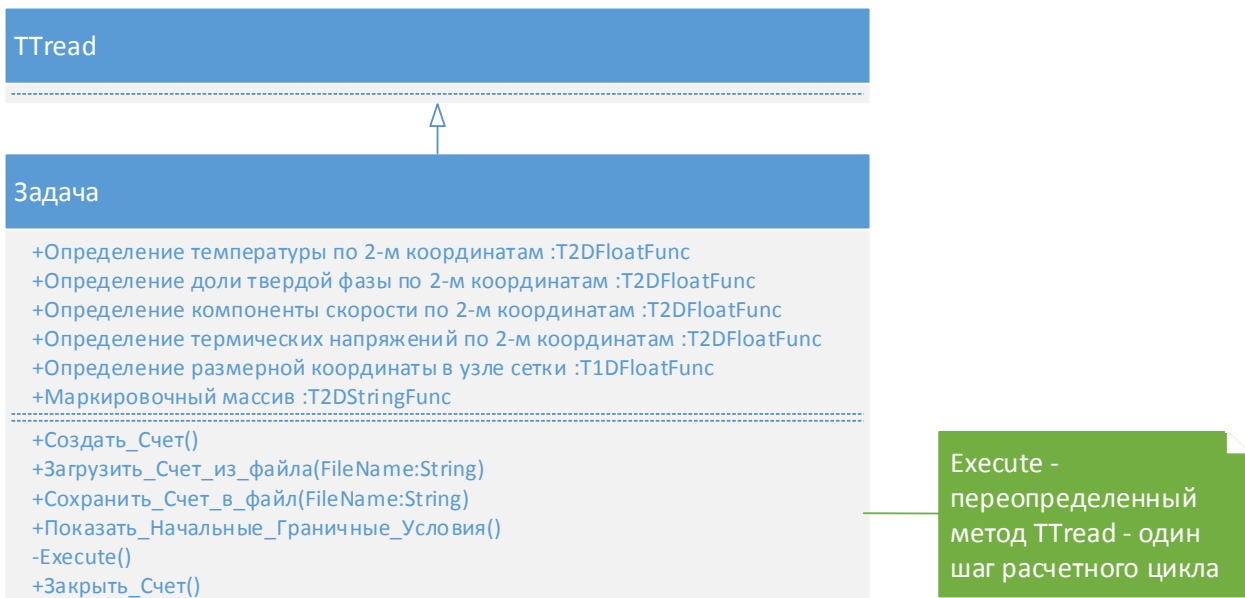


Рис.3.4. Класс «Задача»

Библиотека «Types» (рис.3.3 -1) содержит описания функциональных (процедурных) типов, преобразование стандартных типов для удобства, некоторые общие константы и битовые маски.

Некоторые типы преобразования:

Float – имеет значение double для 32-х разрядных версий windows, real – для более старых систем

Pfloat – указатель на Float

Некоторые функциональные типы:

```

TProc = procedure;
TFloatFunc = function: Float;
TIntFunc = function: Integer;
TFileProc = procedure(var F: File);
T2DProc = procedure(const Y, X: Integer);
T1DProc = procedure(const X: Integer);
  
```

Перечислимый тип для определения режима вывода цветовой схемы (температура, доля твердой фазы, функция тока, вихревая структура, компоненты скорости, термические напряжения):

```
TShowMode = (mNone, mTemper, mSP, mPsi, mFi, mV1, mV2, mTensions);
```

Битовые константы для определения режима расчета:

```

toGidro = $0001; - учет гидродинамики
toRun = $0004; - флаг выполнения расчета
toZalivka = $0010; - учет заливки
toAutoSave = $0040; - включение/выключение режима автосохранения счета
toPause = $0080; - флаг режима паузы
toTensions = $0100; - учет расчета термических напряжений
  
```

Юнит «Task» содержит класс «Задача» (TTask), в который входят свойства в виде переменных функциональных типов, описывающие общие параметры задач переноса и затвердевания (такие как массив температур, скоростей, доли твердой фазы и т.п.) и методы, отвечающие за выполнение общих этапов расчета. Здесь свойства класса представляют собой «пустые» функции, которые использу-

ются в общих процедурах счета. Происходит это обычно подобным образом: создаем переменную класса вида `Temperature: T2DFloatFunc`, затем используем вид `Temperature(Y,X)` для получения температуры в любой точке расчетной сетки (например, `Print(Temperature(10,10))`).

Цель класса «Задача» – инкапсуляция действий, общих для любой расчетной задачи. Предполагаем, что процесс происходит следующим образом. Прикладная программа находится в режиме ожидания следующих возможных действий:

1. команды нового расчета,
2. просмотра сохраненных результатов,
3. закрытия программы.

Если пользователь дает команду начать или продолжить расчет:

1. создается соответствующий объект – переменная класса «Задача»;
2. инициализируются начальные значения для расчета или считывается ранее сохраненное состояние;
3. выполняет главный расчетный цикл до тех пор, пока не выполнятся условия завершения вычислений или не поступит команда пользователя на остановку;
4. во время выполнения цикла необходимо обеспечить фоновое сохранение состояния, вывод результатов и взаимодействие с пользователем;
5. по завершении расчета происходит уничтожение соответствующего объекта с сопутствующим освобождением памяти и «обнулением» адресов функций;
6. программа возвращается в состояние ожидания.

Если конечный пользователь программы дает команду просмотра сохраненных результатов:

1. создается соответствующий объект – переменная класса «Задача»;
2. загружается ранее сохраненное состояние;
3. различные варианты расчетов загружаются необходимое пользователю количество раз;
4. по команде пользователя завершить просмотр происходит уничтожение объекта с сопутствующим освобождением памяти и «обнулением» адресов функций;
5. программа возвращается в состояние ожидания.

Организуем выполнение описываемого расчетного модуля в отдельном потоке ОС Windows, что позволит полноценно использовать современные многоядерные и многопроцессорные компьютерные системы, в частности, повысит отзывчивость пользовательского интерфейса во время расчета. Для этого в качестве прародителя используем класс `TThread (TTask=class(TThread))`.

С точки зрения операционной системы поток — это ее объект. При создании он получает дескриптор и отслеживается ОС. Объект класса `TThread` — это конструкция Delphi, соответствующая потоку ОС. Этот объект VCL создается до реального возникновения потока в системе и уничтожается после его исчезновения. Код, исполняемый в создаваемом потоке, содержится в

методе виртуальном абстрактном методе **Execute**. Переопределяя метод **Execute**, мы можем тем самым закладывать в новый потоковый класс то, что будет выполняться при его запуске. Если поток был создан с аргументом **CreateSuspended**, равным **False**, то метод **Execute** выполняется немедленно, в противном случае **Execute** выполняется после вызова метода **Resume**. В нашем случае поток обычно будет создаваться с отложенным вызовом выполнения, чтобы можно было задавать начальные условия, загружать предыдущее состояние счета и т.п. Кроме того, в режиме просмотра рассчитанных вариантов вообще не потребуется запускать **Execute**.

Именно переопределением метода **Execute** реализовывается главный расчетный цикл программы (рис 3.5).



Рис.3.5. Основной алгоритм главного расчетного цикла

Следует еще отметить запрет на прямое обращение к объектам VCL (с помощью которых реализуются все графические компоненты Delphi) из потока. Delphi предоставляет метод **Synchronize** для безопасного вызова методов VCL внутри потоков. Во избежание конфликтных ситуаций, метод **synchronize** дает гарантию, что к каждому объекту VCL одновременно имеет доступ только один поток. Аргумент, передаваемый в метод **Synchronize**, — это имя метода, который производит обращение к VCL. Производя любое обращение к объекту VCL из потока, необходимо убедиться, что при этом используется метод **Synchronize**; в противном случае результаты могут ока-

заться непредсказуемыми. Кроме того, что необходимо всегда помнить об использовании этого метода, когда понадобится выводить любую графическую информацию или использовать интерфейс пользователя, Synchronize имеет еще несколько недостатков, благодаря которым он подходит лишь для простых многопоточных приложений [3.9].

Synchronize полезен лишь при взаимодействии между рабочим потоком и основным потоком VCL.

Использование Synchronize подразумевает, что рабочий поток ждет, пока основной поток VCL будет в состоянии ожидания, даже когда это не так уж и необходимо.

Если приложение часто использует Synchronize, главный поток VCL становится "узким местом", и возникают проблемы с производительностью.

Если Synchronize используется для непосредственного взаимодействия двух рабочих потоков, оба они могут быть приостановлены, ожидая главный поток.

Synchronize может вызвать заикливание, если главный поток VCL ожидает другие потоки.

Способ обмена данными между расчетной и графической интерфейсной частью, который используется в данной работе, не требует использования метода **Synchronize**, равно как и других методов режима взаимных исключений (мьютекса, критических секций и т.п.). Это тоже можно считать преимуществом разрабатываемой системы.

К программному модулю «Задача» можно отнести и юнит «Settings» (рис.3.3, 3). С его помощью можно настроить некоторые параметры выполнения программы: приоритет расчета, время автоматического обновления экрана данных, контрольное время счета и т.д. Типичное окно настроек представлено на рис. 3.6.

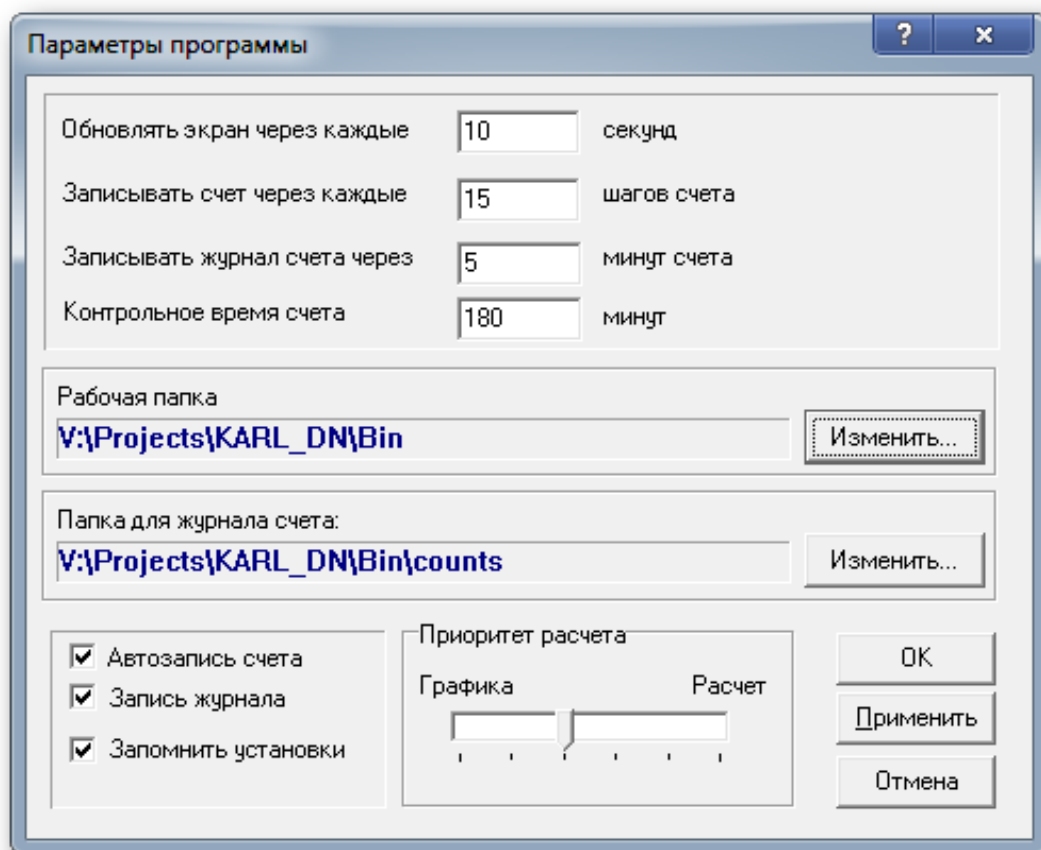


Рис.3.6. Окно настройки параметров

Библиотека подпрограмм «Математическая модель».

Обобщённая математическая модель (глава 2) является основой для расчетного алгоритма, который реализуется в модуле математической модели. В отличие от описанного выше модуля абстрактной задачи, изменение которого запрещено, здесь весь программный код пишет разработчик расчетной модели. Поэтому этот модуль спроектирован таким образом, чтобы от составителя алгоритма не требовались глубокие знания в области объектно-ориентированного программирования. В рамках данной библиотеки подпрограмм не требуется разрабатывать никаких сложных процедур ввода-вывода или интерфейсных элементов, но настоятельно рекомендуется ввод начальных условий организовать в виде отдельных подпрограмм. Кроме того, обязательно должна присутствовать подпрограмма, в которой описывается один шаг по времени главного расчетного цикла. Также необходимы подпрограммы, сохраняющие основные расчетные массивы на жестком диске.

На рис.3.7. приведена блок-схема расчета по обобщенной математической модели.

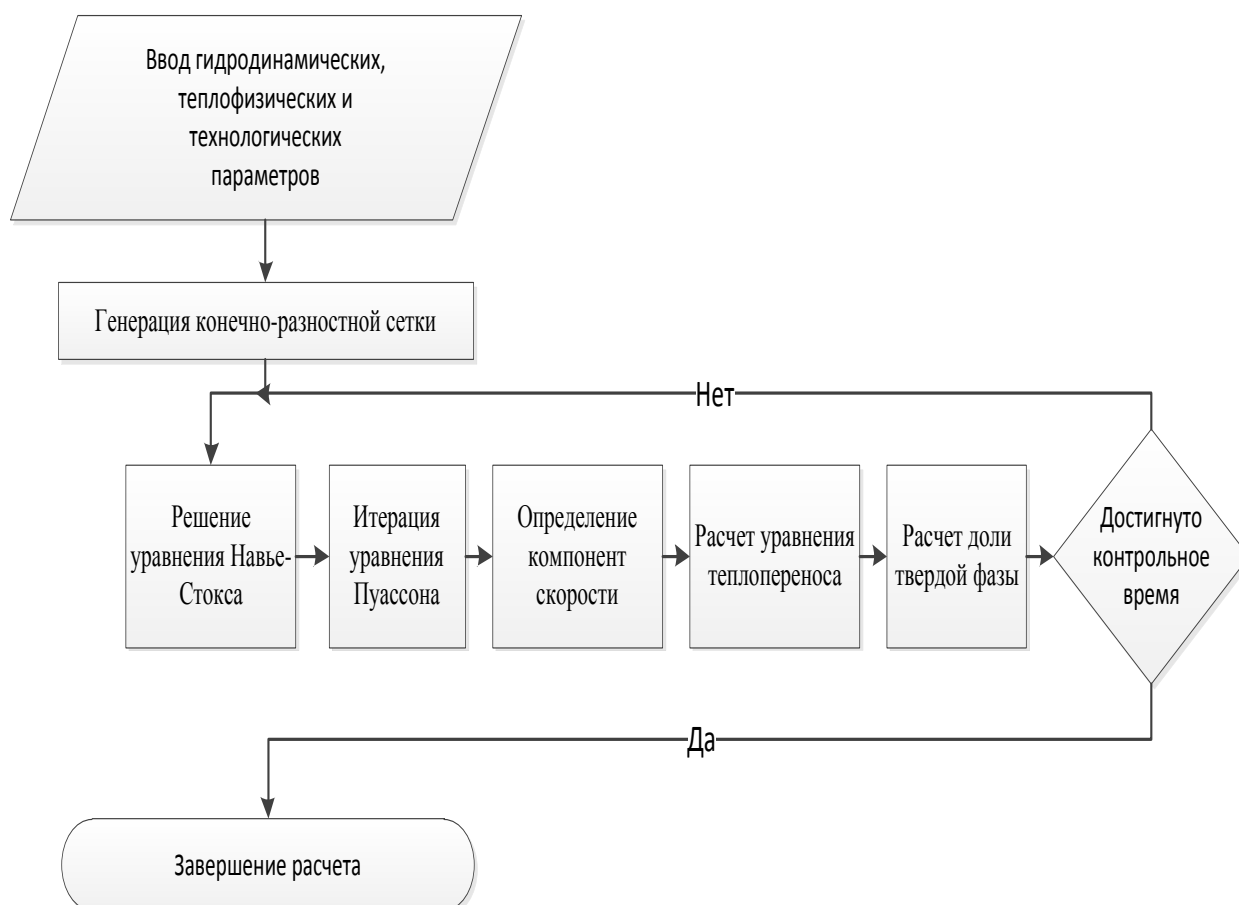


Рис. 3.7. Блок-схема проведения расчета по обобщенной математической модели

На практике описываемый модуль представляет собой один или несколько юнитов языка Delphi или библиотек языка C. В данном примере на рис.3.3 к нему относятся файлы с отметками 4-7.

Юнит «**MTypes**»(рис.3.3 -4) содержит специфичные для математической модели типы данных, константы, глобальные массивы и т.п.

Юниты «**Sifon_Model**»(рис.3.3 -5) и «**ModelAdd**»(рис.3.3 -6) включают в себя процедуры и функции численного моделирования. Данные юниты написаны, как правило, с помощью структурного программирования. В настоящем случае это является более эффективным, т.к. получаем более высокую скорость выполнения расчета, чем при использовании иерархий ООП. Главной подпрограммой расчета, из которой в различной форме происходит вызов всех остальных, является «**Run**». Она представляет собой шаг цикла по времени. На рис.3.8 приведен краткий алгоритм этой подпрограммы.

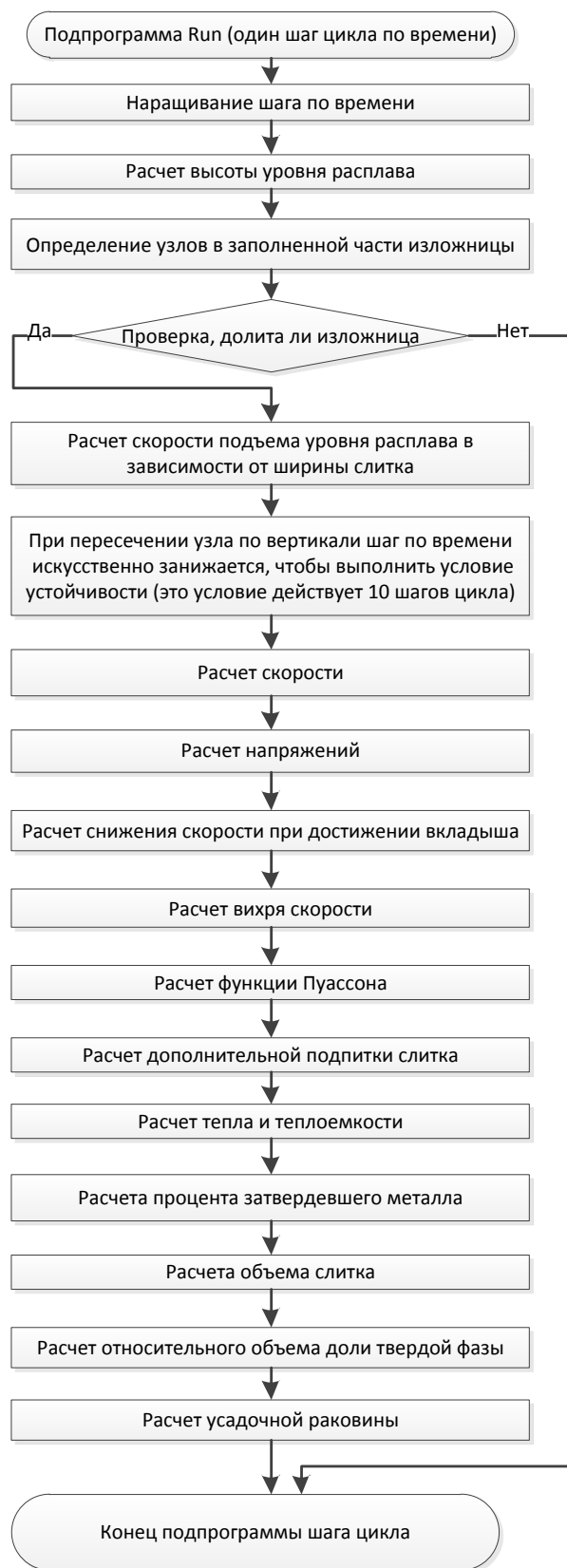


Рис. 3.8. Сокращенный алгоритм подпрограммы шага цикла по времени

Последний относящийся к математической модели юнит «Setti» (рис.3.3 -7) содержит форму ввода начальных условий и выбор варианта изложницы из базы данных (рис.3.9).

Установки задачи

Начальные условия

Скорость поступления металла в изложницу	180
Высота налива изложницы	3,13
Температура изложницы	50
Температура ликвидус	1470
Температура среды	20
Начальная температура	1550
Высота изложницы	3,2
Характерный размер	0,25
Тоннаж	4300

Раздевание слитка

Время раздевания слитка: 1 часов 0 мин.

Вариант изложницы

Чугунная изложница (по умолчанию)

Теплопроводность	34
Теплоемкость	7780
Плотность	960
Глубина вкладыша	270

OK

Отмена

Рис.3.9. Пример окна ввода начальных условий

Модуль сопряжения

Модуль сопряжения, как уже было показано выше (рис.3.1) осуществляет связь между объектом «Задача» и модулем математической модели. На схеме 3.3 это файл под номером 8 «Convert».

В основе работы подпрограмм конвертации лежат такие особенности языка Delphi как поддержка процедурных (функциональных) типов и использование ссылочной модели. Основное назначение процедурных типов – дать программисту гибкие средства передачи функций и процедур в качестве фактических параметров обращения к другим процедурам и функциям.

Для объявления процедурного типа используется заголовок процедуры (функции), в котором опускается ее имя (как было показано в примерах типов библиотеки «Types»). Переменным процедурных типов допускается присваивать в качестве значений имена соответствующих подпрограмм. После

такого присваивания имя переменной становится синонимом имени подпрограммы.

Структура юнита «Convert» следующая:

Для каждой из используемых переменных процедурных типов создается своя, видимая только в пределах данного модуля функция, в которой вычисляется необходимое значение. Например, описывается функция вида

```
function _T(const Y,X: Integer): Float;
begin
  result := Round(Model.T[Y,X]*Model.TX);
end; ,
```

где **Model.T** – массив температур, **Model.TX** – коэффициент обеззараживания из модуля математической модели.

Создается глобальная подпрограмма вида **Convertation(var Task: TTask)**, в которой происходит присваивание полям объекта **Task** имен соответствующих функций. Для приведенного примера это выглядит как **Task.Temperature := _T**. Также поступают и с подпрограммами из модуля математической модели. В частности, для подпрограммы выполнения одного шага цикла по времени происходит следующее присваивание: **Task.ExecuteModel:= Model.Run**.

Процесс сопряжения на примере отдельно взятого значения иллюстрирует рис.3.10.

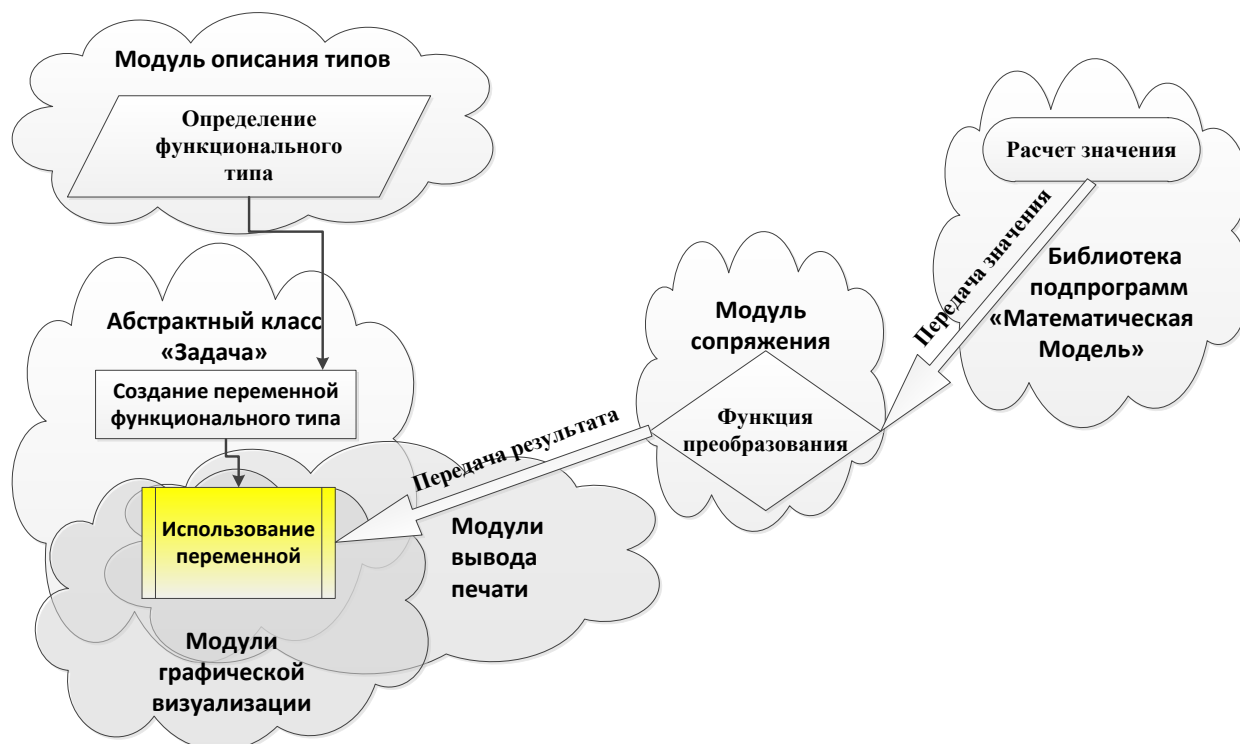


Рис.3.10. Внутреннее взаимодействие модулей

3.2. Проектирование интерфейса пользователя

Почему пользовательский интерфейс столь важен для пользователей, проектировщиков и разработчиков программных продуктов? Потому что это то, что пользователи видят перед собой и с чем они работают. Различия между навыками пользователей, проектировщиков и разработчиков, различия между точками зрения, опытом – причина многих проблем в нашей жизни и не только в компьютерных системах. Многие книги и руководства по проектированию пользовательского интерфейса говорят об этих точках зрения как о различных моделях пользовательского интерфейса[3.10].

Когда говорят о научных основах проектирования пользовательских интерфейсов, в первую очередь упоминают термин HCI. HCI — это аббревиатура английского Human-Computer Interaction, что переводится как "взаимодействие человека и компьютера".

Составными частями HCI являются:

- человек (пользователь);
- компьютер;
- их взаимодействие.

Пользовательский интерфейс (англ. user interface, UI) является своеобразным коммуникационным каналом, по которому осуществляется взаимодействие пользователя и компьютера.

Выделяют три модели пользовательского интерфейса – пользовательской, программиста, проектировщика. Модель отражает ожидания человека, работающего с компьютером, и тот опыт, который он получает в результате. Это лишь формальная расшифровка опыта и ожиданий пользователя от окружающего мира.

Ментальная, или концептуальная, модель – внутреннее отображение того, как пользователь понимает и взаимодействует с системой. Ментальную модель можно представить как отображение (в основном) физической системы или компьютерного программного обеспечения, в котором заложена вероятная последовательность действий при выполнении операций ввода и вывода. Люди формируют ментальные модели по ряду причин. Они позволяют пользователям:

1. предсказывать (или обозначать невидимые) события;
2. найти причины замеченных событий;
3. определить необходимые действия для осуществления нужных изменений;
4. использовать их как мнемонические устройства для запоминания событий и связей (отношений);
5. обеспечить понимание аналогичных устройств;
6. применять стратегии, которые позволяют преодолеть ограничения, заложенные в алгоритме обработки информации.

В основе ментальной модели – все взаимоотношения между пользователями и их компьютерами, поэтому она является фундаментом для выработки принципов и правил пользовательского интерфейса. Когда мы переносим знания об окружающем нас мире в мир компьютеров, начинает действовать концепция метафор. Метафора «рабочий стол» используется в большинстве сегодняшних графических и объектно-ориентированных интерфейсов.

Лучшим пользовательским интерфейсом можно назвать такой интерфейс, которому пользователь не должен уделять много внимания, почти не замечать его. Пользователь просто работает, вместо того, чтобы размышлять, какую кнопку нажать или где щелкнуть мышью. Такой интерфейс называют прозрачным — пользователь как бы смотрит сквозь него на свою работу [3.11].

Чтобы создать эффективный интерфейс, который делал бы работу с программой приятной, нужно понимать, какие задачи будут решать пользователи с помощью данной программы и какие требования к интерфейсу могут возникнуть у пользователей. Это сделать гораздо легче, если разработчик использует свою программу для собственных нужд, ведь в данном случае он является не только разработчиком, но и пользователем программы, смотрит на нее глазами ее аудитории.

Огромную роль играет интуиция – разработчик при создании программы должен чувствовать, где и какой именно элемент нужно убрать или добавить. Необходимо иметь художественный вкус, чтобы понимать, что именно придаст интерфейсу красоту и привлекательность.

Исследователи в области HCI сформулировали основные принципы проектирования пользовательских интерфейсов компьютерных программ. Как и в любой другой науке, существует довольно много различных методик и классификаций.

Одними из самых цитируемых в книгах по HCI являются десять так называемых эвристических правил известнейшего американского специалиста в области проектирования интерфейсов Якоба Нильсена (Jakob Nielsen), разработанных им совместно с другим исследователем, Рольфом Моличем (Rolf Molich). Формулировку этих принципов в оригинале можно прочитать по адресу http://www.useit.com/papers/heuristic/heuristic_list.html[3.12]. Это минимальные критерии, которым должен отвечать интерфейс любой программы.

Видимость состояния системы (правило обратной связи).

Система (в данном случае — компьютерная программа) должна всегда информировать пользователя о состоянии своей работы с помощью соответствующих средств, в разумное время. При рассмотрении этого правила нужно учитывать несколько аспектов.

Информированность пользователя.

Пользователь всегда должен иметь информацию о текущем статусе работы программы — например, сколько времени прошло от начала процесса расчета, когда он будет завершен и т. п. Кроме этого, пользователь обяза-

тельно должен видеть, к чему привело любое его действие: ввод данных, нажатие кнопки и т. п.

Средства обеспечения обратной связи.

Выбор конкретного средства обратной связи зависит от типа информации, которую нужно донести до пользователя, а также типа действия, которое вызывает потребность в обратной связи.

Информация, при рассмотрении данного вопроса, делится на типы в зависимости от ее назначения и степени важности. Например, сообщения о критических ошибках, приводящих к невозможности продолжения работы, обычно выводятся в отдельном диалоговом окне. При этом работа приложения останавливается до тех пор, пока пользователь не закроет окно с информацией об ошибке, а сообщения о незначительных ошибках — в статусной строке окна приложения без остановки его работы.

Время оповещения.

Промежуток времени, в который пользователь получает информацию о реакции на его действие или о событии, должен быть минимальным. Это особенно важно, т. к. от наличия или отсутствия у пользователя информации о текущем состоянии системы определяет его дальнейшие действия. Если он не будет знать, что последняя операция была завершена неудачно, то последующие действия могут вызвать новые ошибки.

Равенство между системой и реальным миром.

Система должна разговаривать с пользователем на его языке. В данном случае подразумевается использование понятий, образов и целых концепций, которые уже знакомы пользователю по реальному миру, по его профессиональным навыкам, к которым он привык. Представление информации и объектов в программе должно быть организовано в естественном и логичном порядке.

Свобода действий пользователя.

Пользователь должен иметь контроль над системой и возможность изменить текущее состояние программы. Очень часто пользователь дает различные команды по ошибке (например, случайно нажав не ту кнопку или "промахнувшись" мышью мимо нужного пункта меню), и у него должен быть "аварийный выход" из этой ситуации, четко обозначенный в программе. Чаще всего такой "выход" реализуется в виде кнопки **Cancel** (Отмена), расположенной в диалоговом окне и позволяющей прекратить выполнение текущей операции или закрыть это диалоговое окно. Кроме этого, нажатие на клавиатуре клавиши <Escape> является традиционным и поэтому привычным для большинства пользователей средством "аварийного выхода".

Хорошим тоном считается, если позволяет текущая ситуация, сочетать оба эти способа — кнопку **Cancel** (Отмена) и клавишу <Escape>: среда разработки Delphi при проектировании форм диалоговых окон позволяет назначить кнопке свойство срабатывания по нажатию клавиши <Escape>.

Еще одно, причем немаловажное, средство выхода из ошибочной ситуации — функции **Undo** (Отменить) и **Redo** (Повторить). Они являются настолько удобными и поддерживаются таким большим количеством программ, что пользователи уже привыкли к ним и подсознательно ожидают, что любое произведенное действие можно отменить, вернувшись к предыдущему состоянию. Все это просто обязывает разработчика качественного интерфейса компьютерной программы поддерживать функции **Undo** и **Redo**. Если же по каким-либо причинам действие, на выполнение которого дал команду пользователь, нельзя будет отменить, то на экран должно быть выведено соответствующее предупреждение, а также просьба подтвердить выполнение команды.

Последовательность и стандарты.

Принцип последовательности означает использование одних и тех же средств для выражения схожих образов и выполнения действий, имеющих одинаковую природу. Принцип последовательности при разработке интерфейсов должен соблюдаться буквально во всем.

Во-первых, последовательность при выборе средств оповещения о событиях и действиях. Например, информация о текущем статусе программы, как уже говорилось при рассмотрении принципа "Видимость состояния системы", обычно выводится в статусную строку в нижней части экрана, а сообщения с результатами запросов пользователя — в отдельном диалоговом окне. Сообщения о критических ошибках при этом должны сильно отличаться от обычных информационных сообщений: например, они могут сопровождаться резким звуком.

Во-вторых, последовательность при оформлении элементов интерфейса.

В-третьих, последовательность при выборе терминов. Пользователей не должно сбивать с толку то, что три разных понятия, используемых в программе, на самом деле означают одно и то же. И дело даже не в том, чтобы подобрать наиболее точное определение какому-либо термину. Главное — решить для себя, что для обозначения какого-то конкретного действия или события применять один конкретный термин, при этом использовать его четко определенным способом, и в ходе работы над программой от этого правила не отступать. Это можно назвать своеобразной разработкой собственного стандарта.

Принцип последовательности — одно из важнейших правил проектирования пользовательских интерфейсов. Последовательный интерфейс интуитивно понятен и очень легок для освоения, т. к. при его изучении пользователь не сталкивается с сюрпризами, и даже те части интерфейса, которые он видит впервые, кажутся ему давно знакомыми. Если же в одних и тех же ситуациях программа реагирует по-разному, элементы управления в формах имеют различную компоновку, а текстовые сообщения удивляют все новыми и новыми терминами, то вся программа станет для пользователя одним сплошным сюрпризом.

Предупреждение ошибок.

Применительно к теме проектирования интерфейсов компьютерных программ, принцип предупреждения ошибок означает следующее: "Дизайн, который предупреждает возникновение проблем, лучше, чем самое хорошее сообщение об ошибке".

Интерфейс, предупреждающий возникновение ошибок и связанных с ними проблем, образно называют "услужливым". Программа как бы заботится о пользователе, будучи всегда готовой предложить пользователю помощь, дать подсказку.

Кроме того, уменьшение вероятности возникновения ошибок пользователя при работе с программой достигается тщательной проработкой всех элементов интерфейса и его концепции в целом в соответствии с правилами проектирования интерфейсов. Интуитивно понятный, легкий для освоения интерфейс у большинства пользователей не вызывает никаких затруднений.

Понимание лучше, чем запоминание.

При разработке интерфейса нужно делать все объекты, функции, действия видимыми и легко доступными пользователю. Пользователь не должен постоянно стараться удержать в памяти информацию из одной части программы, чтобы применить ее в другой. В любой момент пользователю должно быть ясно, что нужно делать в данный момент. В хорошем интерфейсе инструкции по использованию системы всегда видимы или легко доступны для вызова в любое время, когда это требуется. Это может быть реализовано как в виде продуманной организации элементов интерфейса, так и непосредственно в виде подсказок пользователю.

Это правило отражает принцип прозрачного интерфейса — интерфейса, который понятен и не заставляет пользователя вспоминать, какую же кнопку нужно нажать или какой пункт меню выбрать в данный момент.

Гибкость и эффективность использования.

При проектировании интерфейса перед разработчиком часто встает такая проблема: требуется, чтобы интерфейс был одинаково удобен и для новичков, и для опытных пользователей. Но нужно учитывать, это во многом разные потребители, с разными требованиями к программе и разным стилем работы. Если сделать простой интерфейс с минимумом опций, который будет легок для освоения новичками, то более опытные пользователи не смогут работать с программой достаточно эффективно, чтобы удовлетворять свои потребности.

Для решения этой проблемы прибегают к простому приему: функции, которые ускоряют работу, оформлены так, что они не видны начинающим, но легко доступны продвинутым пользователям. Самый простой пример — это "горячие клавиши", с помощью которых можно быстро вызвать часто выполняющиеся функции программы, в частности открытие и сохранение файлов. Обозначения "горячих клавиш" пишутся рядом с соответствующими пунктами меню, поэтому они, с одной стороны, не мешают новичкам (они

могут воспользоваться мышью для выбора пункта меню или щелчка по кнопке на панели инструментов), а, с другой стороны, легко доступны опытным пользователям.

Другой пример реализации универсального "интерфейса для каждого" — возможность выполнить сложные функции программы как с помощью Мастера, который, словно за руку, проведет начинающего пользователя по всем этапам процесса, так и вручную, посредством настройки опций в соответствующем диалоговом окне.

Эстетичный и минималистический дизайн.

Это правило означает: "Ничего лишнего". Не нужно загромождать интерфейс программы элементами, которые в данном случае являются неуместными и малополезными. Дело в том, что каждый элемент, будь то кнопка или текстовая подпись, обязательно отвлекает часть внимания пользователя. Это может привести к тому, что видимость и, соответственно, легкость восприятия пользователем действительно нужных и полезных частей интерфейса будет сильно уменьшена за счет элементов, без которых в данном случае можно было бы вполне обойтись.

Распознавание и исправление ошибок.

Это правило определяет проектирование сообщений об ошибках. Хорошие сообщения об ошибках — это сообщения, которые объясняют, в чем состоит проблема и, самое главное, как ее исправить. Таким образом, хорошее сообщение об ошибке должно состоять из двух частей.

Описание ошибки.

Оно должно быть четким, ясным и понятным, давать пользователю всю необходимую информацию о причинах и месте возникновения ошибки. Многие разработчики программ опасаются делать сообщения об ошибках очень информативными, чтобы не "пугать" начинающих пользователей техническими подробностями. Однако в этом случае нарушается описанный выше принцип гибкости и эффективности использования: опытные пользователи, получив слишком краткое сообщение об ошибке, не могут выяснить ее причину. А программа, в которой появляются какие-то непонятные ошибки, в конце концов начинает производить впечатление некачественной поделки.

Самое простое решение — создать в справочной системе программы соответствующий раздел, разъясняющий содержание проблемы и причины ее возникновения. В самом же диалоговом окне с сообщением об ошибке может присутствовать кнопка **Справка** для вызова этого раздела. Чисто технически реализовать это очень просто: системе программирования **Delphi** для создания таких дружественных сообщений об ошибках достаточно при вызове функции **MessageBox** указать флаг наличия кнопки **Справка** и идентификатор соответствующего раздела справки.

Еще один пример решения, причем более изящного, данной проблемы является кнопка **Подробнее**, при нажатии на которую диалоговое окно с сообщением об ошибке "распахивается", отображая более подробную информацию о причине возникновения сбоя.

Описание решения проблемы

Как уже упоминалось выше, информация о том, как исправить ошибку или решить проблему имеет даже большее значение, чем собственно описание ошибки или проблемы. Ведь подсказка, помогающая решить проблему, способствует реализации одного из принципов построения пользовательского интерфейса — программа должна помогать выполнить задачу, а не становиться этой задачей.

Большинство разработчиков программ размещают описание решения проблемы в разделе справочной системы, посвященном соответствующей ошибке. Но можно включить эту информацию прямо в диалоговое окно сообщения об ошибке.

При описании пути решения проблемы, как и при написании любой документации, нужно избегать составления слишком объемных текстов, т. к. пользователи будут просто пробегать их глазами, не вникая в смысл написанного. Лучше всего составить что-то наподобие пошаговой инструкции, каждый шаг из которой составляет 1-2 предложения.

Справка и документация.

Принцип о необходимости предоставления справочной системы и документации к программе, идущий в списке Якоба Нильсена последним, не становится от этого менее важным. С помощью **Справки** пользователи могут быстро найти ответы на возникающие у них вопросы по работе с программой. Хорошо составленная документация избавляет разработчика от необходимости отвечать на одни и те же вопросы пользователей.

Общая схема построения интерфейса

Графический интерфейс пользователя описываемой системы относится к многодокументному, или мультидокументному, типу интерфейса (Multi-Document Interface, MDI). MDI отличается от однодокументного интерфейса (Single Document Interface, SDI) тем, что главное окно программы может содержать другие, подчиненные окна, которые нельзя переместить за пределы основного окна. Такие подчиненные окна называют "child", т. е. "детскими", а окно, которое их содержит, соответственно, "parent" - "родительским". Как родительские, так и детские окна могут иметь свои меню, причем меню главного окна меняется на меню подчиненного окна, если последнее максимизируется, расширяясь до его, главного окна, границ.

Центральным звеном графического интерфейса пользователя описываемой системы является юнит VMSI (Visual Mathematical Simulation Interface) (рис.3.3 -9), который содержит главную форму приложения. Данная форма принадлежит к стилю **fsMDIForm**, т.е. является родительской в парадигме MDI.

Управляющими компонентами являются меню с двумя наборами команд (для режимов расчета и просмотра) и две панели инструментов (для тех

же целей). Кроме того, предусмотрены несколько контекстных всплывающих меню для вспомогательных целей.

При создании или открытии расчета инициализируется объект **vTask** – экземпляр класса «Задача». **vTask** – зарезервированное имя для обращения к объекту «Задача» во всех библиотеках графического интерфейса (рис.3.3 №№9-19). При отсутствии расчета **vTask** имеет нулевое значение (nil).

Для информирования пользователя используется панель состояния. Данная панель разбита на три секции. В первой показывается текущее состояние расчета (как правило, время счета), во второй индикатор расчета, в третьей выводятся текущие подсказки и сообщения о незначительных ошибках. Данные о расчете при этом берутся из объекта vTask и настроек задачи. Индикатор расчета представляет собой компонент Delphi TGauge, внедренный в панель состояния, который показывает процент выполненного исходя из времени расчета.

Перед изменением активной формы Delphi происходит событие **Screen.OnActiveFormChange**. Создадим обработчик этого события, чтобы выполнять какую-либо обработку каждый раз перед изменением главного окна программы. В обработчике настраиваются разрешения видимости и доступности для пунктов меню и кнопок панели инструментов в зависимости от режима работы программы, состояния счета и т.д.

Для автоматического обновления окон, в которых показываются данные расчета, используется компонент **Timer**. Этот таймер срабатывает через промежуток времени, указанный в настройках (рис.3.6). При этом всем открытым подчиненным окнам («MDI Child») посылается команда на обновление содержимого. Таким образом, поток, в котором выполняется расчет задачи, не прерывается на вывод данных. И поскольку этот поток не выполняет кода VCL, и поток с пользовательским интерфейсом не модифицирует данные из объекта расчета, то выполняющийся процесс не нуждается в механизме синхронизации потоков. Это значительно упрощает разработку и ускоряет расчет прикладной задачи.

Еще один таймер следит за процессом расчета и выводит информацию в панель состояния.

Справочная система представляет собой скомпилированный файл справки Windows, подключенный к программе. Предусмотрено два режима работы со справкой:

1. Вызов файла справки с помощью соответствующей кнопки;
2. Вызов контекстной справки в зависимости от ситуации.

Второй режим работы активируется нажатием кнопки контекстной справки. Пока режим активен, кнопка остается в нажатом состоянии. Курсор мыши при этом принимает вид стрелки со знаком вопроса. Нажатие кнопки мыши при подведении курсора на интересующем элементе интерфейса главного или подчиненного окна вызывает соответствующий раздел справочной системы. При этом происходит выход из режима контекстной справки. Если

объект не выбран, то выход осуществляется повторным нажатием кнопки справки.

Реализуется данное поведение с помощью создания соответствующего поля логического типа и управляемого доступа к этому полю через конструкцию **property IsHelpMode: Boolean read GetHelpMode write SetHelpMode default false**. Для всех компонентов VCL, где предполагается справка, установлен обработчик события нажатия левой кнопки мыши. Обработчик проверяет активность режима справки (**IsHelpMode=true**). Если режим активен, то отменяется реакция на возможное событие щелчка мыши («**OnClick**») и происходит вызов раздела справки.

Разработка визуальных компонентов

В наше время невозможно представить себе процесс математического моделирования без вывода результатов расчетов в графическом виде. Схема графической интерпретации представлена на рис.3.11.

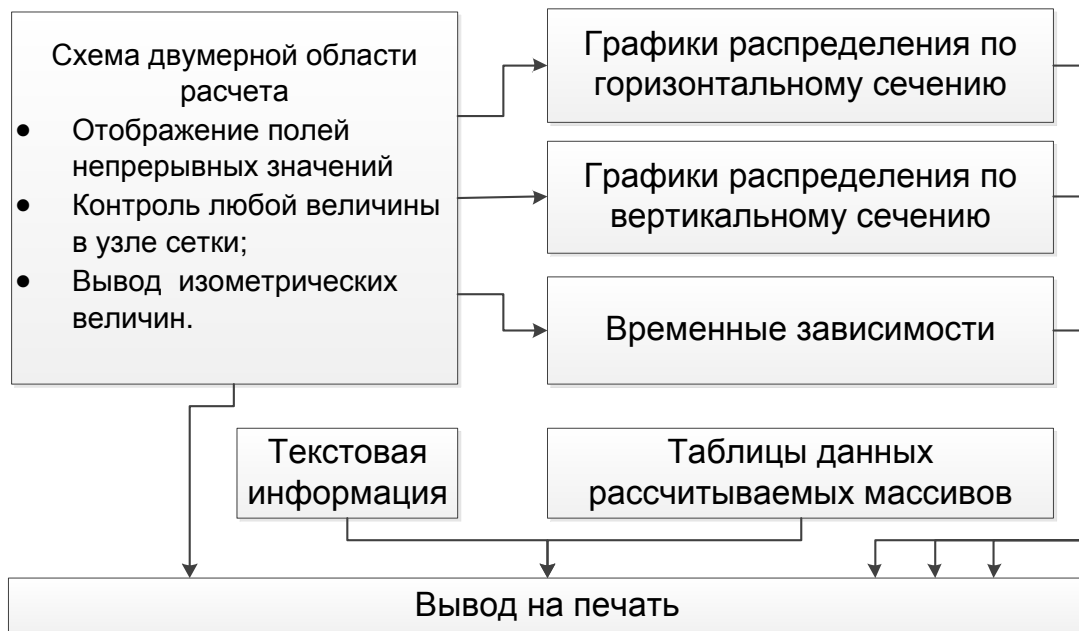


Рис.3.11. Схема обработки результатов счета

Центральным звеном является схема двумерной области расчета (содержится в библиотеке **MForm** на рис.3.3,10). Как правило, задачу моделирования металлургических процессов в изложницах можно свести к двумерной осесимметричной модели. Схема области расчета визуализирует данную модель с помощью раскрашивания в разные оттенки в зависимости от значения выбранного поля. По умолчанию предусмотрена работа с полями температур, горизонтальной и вертикальной проекций скорости и доли твердой фазы. Но можно добавлять и любые другие поля, представляющие собой двумерные массивы, например, массив локальных термических напряжений и т.п.

Проектирование формы схемы области расчета представлено на рис.3.12.

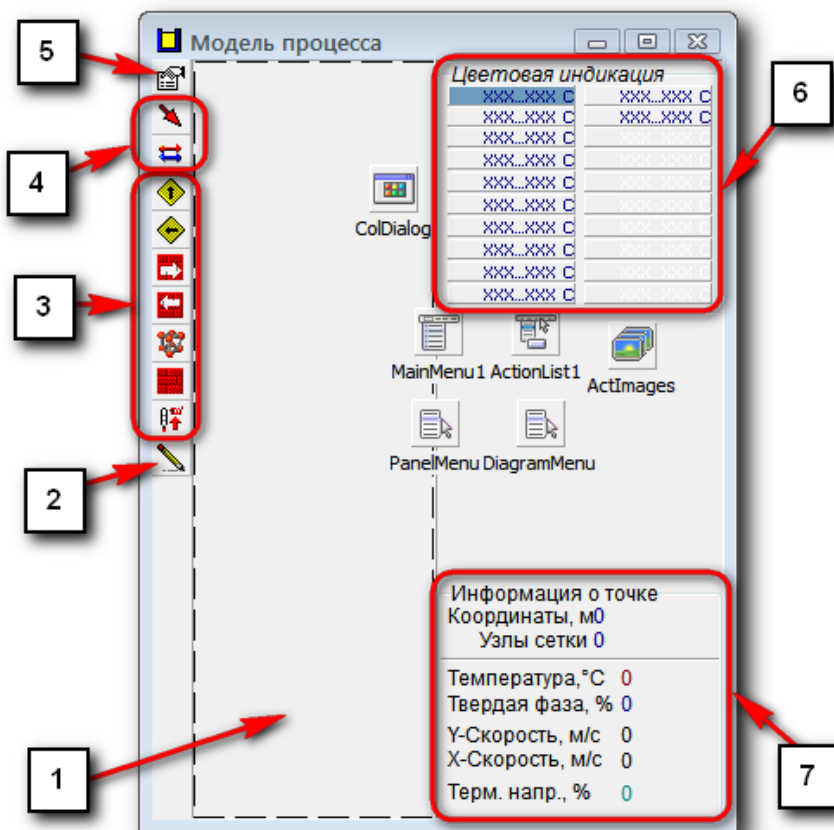


Рис.3.12. Проектирование формы расчетной области:

1-цветовая область, 2-кнопка принудительного обновления, 3-кнопки выбора поля, 4-кнопки выбора векторных характеристик, 5-кнопка настроек, 6-панели настроек диапазонов значений и оттенков цвета, 7-панель информации текущего узла сетки.

Реализуется заполнение цветовой области с помощью компонента Delphi **TPaintbox** (рис.3.12,1), который задает прямоугольную область для выполнения графических операций, используя его свойство **Canvas**. При этом используются такие возможности канвы как карандаш, кисть и методы построения геометрических фигур. Для этого класса определено событие **OnPaint**, возникающее перед тем, как компонент должен быть перерисован. В обработчике данного события задается пересчет расчетной сетки в экранные пиксели и производится отрисовка закрашенных прямоугольников, соответствующих ячейкам сетки. Предусматривается 18 вариантов интервалов значений и связанных с ними цветов. Для просмотра и изменения пользователем этих параметров используется набор панелей (рис.3.12,6). Начальные данные хранятся в ветке «**HKEY_LOCAL_MACHINE\Software\VMSI**» реестра Windows. Измененные пользователем значения записываются в ветку «**HKEY_CURRENT_USER\Software**» в раздел прикладной программы. Таким образом, каждый пользователь может настроить вид схемы на свой вкус.

Переключение выводимых полей производится с помощью набора селекторных кнопок (рис.3.12,3).

Если разработчик математической модели предоставляет специальный маркировочный массив, в котором описана геометрия области, то на цветовую область накладываются контуры внутренних и внешних границ излощины, заполнителя и т.д.

Также разработаны функции, которые позволяют накладывать на область различные изолинии (функции тока, вихревой структуры, изотермы и т.п.) и стрелки, указывающие направление вектора скорости. Вызываются эти функции с помощью кнопок 4 на рис.3.12. Кнопка 5 вызывает диалоговое окно настроек для указанных функций (рис.3.3,14).

В обработчике события **PaintBox.OnMouseMove** производится вывод информации из текущей (под курсором мыши) ячейки расчетной сетки в область 7 на рис. 3.12.

Важную смысловую нагрузку несут графики функций распределения по сечениям и по времени. Компонент Delphi, который позволяет строить различные диаграммы и графики, является **TChart**. Данный объект является контейнером объектов **Series** типа **TChartSeries** – серий данных, характеризующихся различными стилями отображения. Каждая серия соответствует одной кривой на графике. Значения в эти серии заносятся как статические точки (X,Y). Поэтому, чтобы обновлять график с течением времени, необходимо очищать серии и вносить новые рассчитанные точки. Это замедляет расчет прикладной задачи. Поэтому, и еще по ряду причин, было принято решение отказаться от стандартного компонента построения диаграмм Delphi **TChart** и разработать свой с учетом особенностей использования процедурных типов.

Компонент создается с помощью наследования класса **TPanel**. Данный компонент тоже является контейнером объектов-графиков, организованного в виде поля **GraphicList: TList**. Один график является экземпляром спроектированного для описания графика класса **TGraphics**. Свойствами этого класса являются такие характеристики как цвет, вид линии, толщина линии и т.п. Данные для графика можно получать как в виде статических точек, так и в виде переменных функционального типа **T1DFloatFunc**, описанного в библиотеке **Types** (рис.3.3,1). Указателем, какого вида данные получает объект, является поле **GraphicData** специально для него созданного типа **TGraphicData = (DynamicData, StaticData)**. При этом для динамического вида данных необходима только начальная инициализация. В дальнейшем при обновлении окна график меняется автоматически, т.к. работает не с неизменными переданными ему значениями, а с адресом функции.

Графики строятся непосредственно на канве с помощью функций **MoveTo** и **LineTo**. Поскольку компонент является наследником класса **TPanel**, переопределяются виртуальные методы **Paint** (для прорисовки содержимого) и **Resize** (для корректного изменения размеров). Также свойствами компонента является координатная сетка (количество ее ячеек, толщина линий, цвет и т.п.), легенда (текст подписи, настройки шрифта). Кроме того, обработчик события

OnMouseMove определен таким образом, чтобы выводить значение координатной сетки под курсором в дополнительную подсказку, которая показывается во время исполнения программы в панели состояния.

Для вывода графиков используется форма «**qGraph**» (рис.3.3,15). Как уже было сказано, в интерфейсной оболочке используется множество видов диаграмм различных функций распределения. Управляет вызовом графиков библиотека «**Diagrams**» (рис.3.3,13). В ней также используется юнит «**Level**» (рис.3.3,12), который содержит диалоговое окно выбора горизонтали или вертикали, по которой строится график распределения.

Юнит «**UText**» (рис.3.3,11) включает окно вывода текущих рассчитываемых значений. Вывод осуществляется с использованием компонента **TMemo**, которое представляет собой поле для отображения и редактирования неформатированного текста. Текст доступен через свойство **Lines**, которое содержит массив строк, находящихся в компоненте. Данному свойству во время обновления окна происходит присваивание списка значений из модуля математической модели через модуль сопряжения: **Lines.Assign(vTask.UserList)**.

Юнит «**Monitor**» (рис.3.3,17) представляет собой монитор данных, который выводит текущие рассчитываемые массивы в виде таблицы.

Юнит «**Cursors**» (рис.3.3,18) содержит набор курсоров мыши.

Юнит «**Minimize**» (рис.3.3,16) обеспечивает сворачивание главного окна программы в системный трей Windows для фонового проведения расчетов.

Юнит «**Printing**» (рис.3.3,19) отвечает за вывод на принтер.

3.3. Пользовательская работа с интерфейсом

Позволяет работать в 2-х режимах: расчета и просмотра.

В режиме расчета можно начинать расчет новой задачи с выбором начальных значений, ставить процесс расчета на паузу, сохранять и в дальнейшем продолжать с любого места.

В режиме просмотра можно просматривать как отдельные сохраненные файлы со счетом, так и их непрерывные последовательности, т.н. журнал счета. При этом можно получить представление о развитии процесса во времени.

Переключение между режимами счета и просмотра производится соответствующими пунктами меню Счет или кнопками на панели задач.

Пользователь может получать информацию следующими способами:

- с помощью визуализации схематической области, в которой происходит расчет;
- с помощью графиков температуры, доли твердой фазы, компонент скорости и т.п. на каком-либо горизонтальном или вертикальном срезе;

- с помощью текстового просмотра расчетных массивов температуры, доли твердой фазы и т.п.;
- с помощью просмотра значений избранных величин, таких как, объем усадочной раковины.

Любое из окон с информацией можно вывести на печать.

Во время работы в строке состояния отображаются время счета, процент выполнения и текущие подсказки:



Как начать новый расчёт

Выберите пункт меню Счет -> Новый или соответствующий значок на панели инструментов. Появится диалоговое окно с предложением начальных условий задачи. Установите нужные параметры и нажмите [Ok]. В процессе расчета в информационной панели в нижней части экрана отображается время счета.

Как приостанавливать, сохранять и продолжать расчет

Пункт меню Счет -> Пауза приостанавливает процесс расчета. Повторное нажатие возобновляет. Пункт Счет -> Сохранить открывает диалоговое окно записи текущего состояния счета в файл. Счет -> Загрузить считывает из выбранного файла сохраненное состояние счета и продолжает расчет.

Кроме того, через каждый указанный в настройках программы интервал времени происходит автоматическое сохранение, а при завершении программы требуется дополнительное подтверждение сохранения расчета.

Как записывать журнал расчета

Под журналом счета подразумевается набор сохраненных файлов счета в какой-либо определенной папке. Файлы сохраняются последовательно через определенный интервал времени и отличаются возрастанием порядкового номера в имени файла (например, Sifon000.sifon, Sifon001.sifon, Sifon002.sifon и т.д.).

В настройках программы укажите папку и интервал времени в минутах, через который будут записываться файлы журнала.

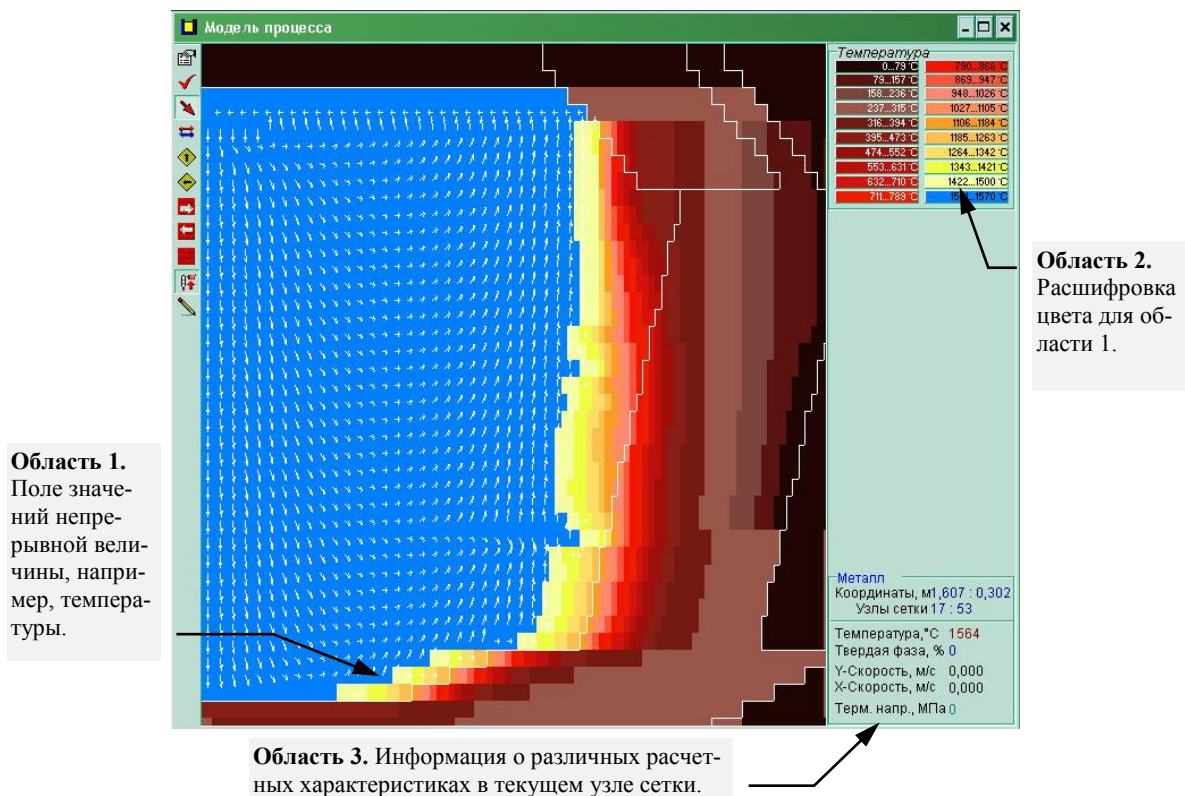
Как просматривать насчитанные варианты с помощью журналов расчета

Перейдите в режим просмотра и откройте первый файл счета в папке с журналом. С помощью раздела меню Счет или соответствующей области панели инструментов (в виде кнопок плеера) можно переходить на любой файл счета из доступной последовательности. При этом автоматически обновляются все открытые информационные окна (например, с графиками). Если

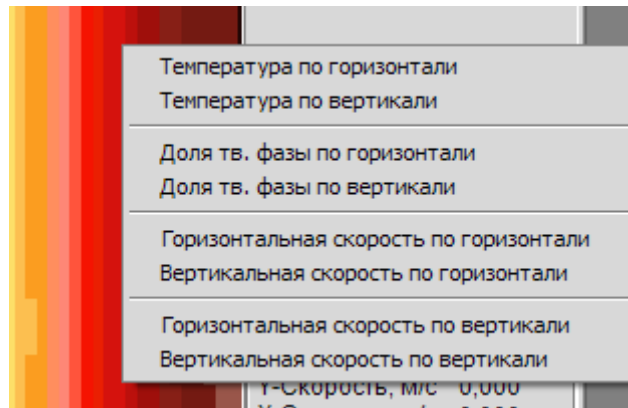
выбрать режим непрерывного воспроизведения счета, то можно просмотреть процесс в развитии во времени.



Работа с областью модели

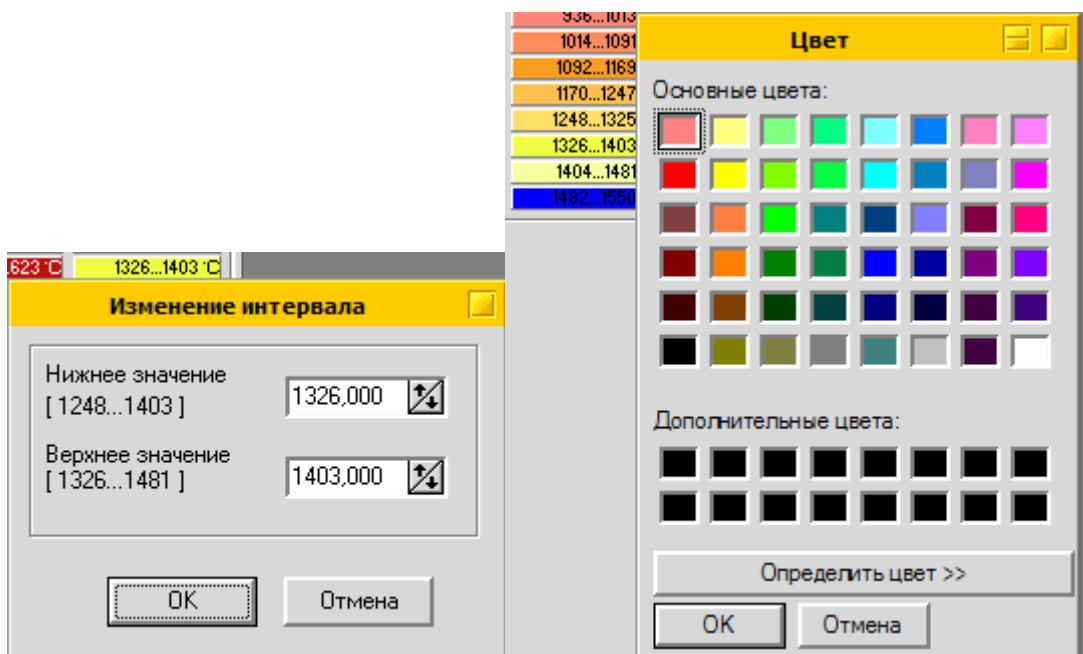
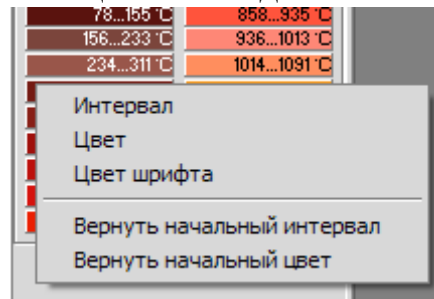


Эту схему условно можно разделить на три информационные области. Первая область представляет собой цветовую схему распределения какой-нибудь непрерывной величины, например, температуры. Каждому определенному интервалу этой величины соответствует свой цвет. Кроме того, на эту область можно накладывать различные векторные характеристики, в частности на рис. изображены векторы скорости. Вторая область показывает соответствие цвета интервалу. Таким образом, бросив даже беглый взгляд, можно получить представление, например, о тепловой обстановке в металлическом слитке. Для более подробного представления информации служит третья область. При перемещении пользователем курсора мыши в первой области, в области 3 отображаются сообщения о той точке расчетной области, где находится курсор (например, координаты, температура, скорости и т.п.). Все параметры описанного отображения информации легко перенастраиваются под предпочтения конечного пользователя с помощью развитой системы контекстных меню.



С помощью контекстного меню в области 1 пользователь также может получить графики горизонтального и вертикального распределения различных величин.

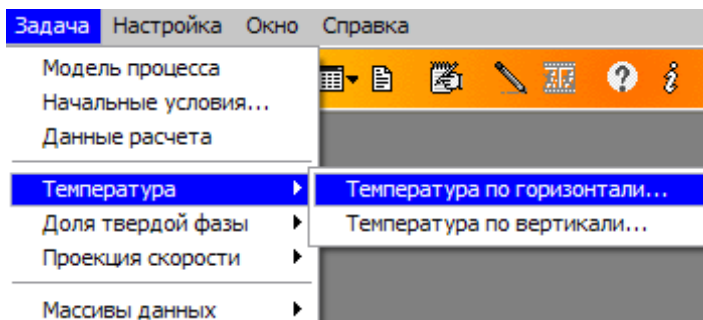
Существует также возможность детальной настройки вывода информации в обл.3. С помощью контекстного меню можно выбирать интервалы значений и соответствующие им цвета выводимых величин.



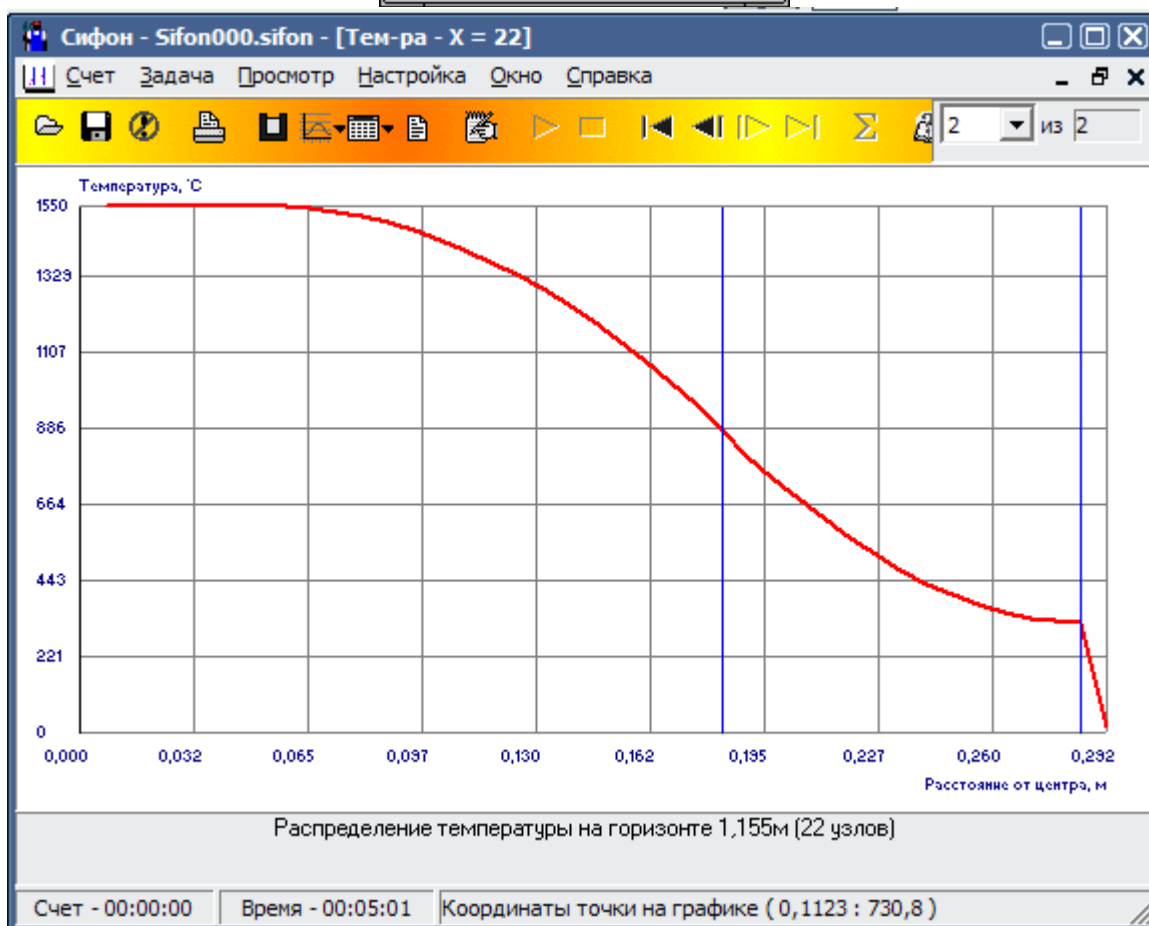
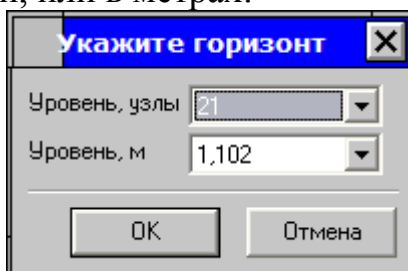
Работа с графиками

Для того чтобы получить график распределения на каком-либо горизонте, можно указать горизонт с помощью контекстного меню в области мо-

дели. Также можно выбрать из меню Задача или кнопки панели управления нужный пункт:



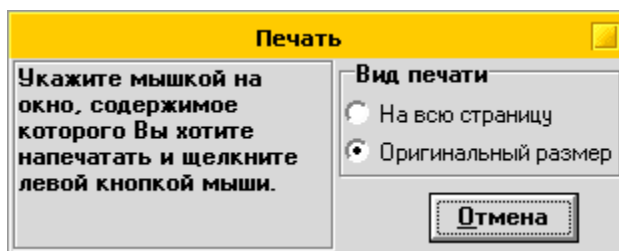
При этом появится диалоговое окно, в котором надо указать требуемый горизонт или в узлах сетки, или в метрах:



Работа с окнами графиков не представляет особых трудностей. На приведенном рисунке все довольно наглядно. Особенностью работы с графиками является то, что при движении курсора мышки в области окна в строке состояния отображаются сеточные координаты точки, на которую он указывает.

Вывод на печать

Выберите пункт меню Счет -> Печать. Появится служебное окно с приглашением выбрать окно с данными для печати. Укажите курсором на данные, которые Вы хотите вывести на принтер и щелкните левой кнопкой мыши.



Таким образом, разработана технология для автоматизации проектирования прикладных программ.

Программная система отличается следующими особенностями при проектировании вычислительных задач:

- разработчик может сосредоточиться только на разработке математической модели, что экономит время на создание программы;
- общую расчетную и интерфейсную часть можно реализовать в виде отдельных динамических библиотек, что сэкономит оперативную и дисковую память компьютера и ускорит скорость расчета;
- независимые интерфейсные библиотеки можно совершенствовать, не переписывая расчетное ядро;
- оставляя неизменной интерфейсную часть, можно варьировать в самых широких пределах математическую модель, на которой основано вычислительное ядро. Это позволяет использовать программную оболочку не только для научно-исследовательских работ, но и в учебном процессе при разработке лабораторно-расчетного практикума.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Фокс Дж. Программное обеспечение и его разработка / Дж.Фокс. – М.: Мир, 1985. – 368 с.
2. Лисков Б., Гатэг Дж. Использование абстракций и спецификаций при разработке программ: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 424 с.
3. Jackson M.-A. A Program Design. Academic Press, 1985.
4. Иан Соммервилл Инженерия программного обеспечения = Software Engineering. – 6-е изд. – М.: «Вильямс», 2002. – С. 642
5. Джек Гринфилд, Кит Шорт, Стив Кук, Стюарт Кент, Джон Крупи Фабрики разработки программ (Software Factories): потоковая сборка типовых приложений, моделирование, структуры и инструменты = Software Factories: Assembling Applications with Patterns, Models, Frameworks, and Tools. – М.: «Диалектика», 2006. – С. 592.
6. Объектно-ориентированный подход технологии программирования / А.Г.Иванов, А.А.Пятницкий, Ю.Е.Филинов – СПб.: Питер, 2003. – 443 с.: ил.
7. Макаров А.А. Лукашин Ю.П. Объектно-ориентированный подход в программировании. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 356 с.
8. Marco Cantu, Wintech italia srl,
<http://www.marcocantu.com/papers/ooplang.htm>
9. Martin Harvey. Multithreading – The Delphi Way.
<http://www.eonclash.com/Tutorials/Multithreading/MartinHarvey1.1>
10. Мандел Тео. Разработка пользовательского интерфейса: Пер. с англ. – М.: ДМК Пресс, 2001. – 416с., ил. (Серия «Для программистов»).
11. Жарков С. Shareware: профессиональная разработка и продвижение программ – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 320 с.
12. http://www.useit.com/papers/heuristic/heuristic_list.htm

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛОМАСООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИВКЕ И ЗАТВЕРДЕВАНИИ СЛИТКОВ ТРУБНОЙ И КОЛЕСНОЙ СТАЛИ

4.1. Оценка влияния концентрационной конвекции

Сопоставление изолинии функций тока (рис.4.1) свидетельствует об отличительных особенностях термоконцентрационной конвекции, проявляющихся в трехстадийности ее развития и наличии в расплаве наряду с тепловыми концентрационными вихрями. Вследствие незначительного вклада концентрационных вихрей в результирующее движение расплава наблюдаются слабые различия в протекании теплокинетических процессов.

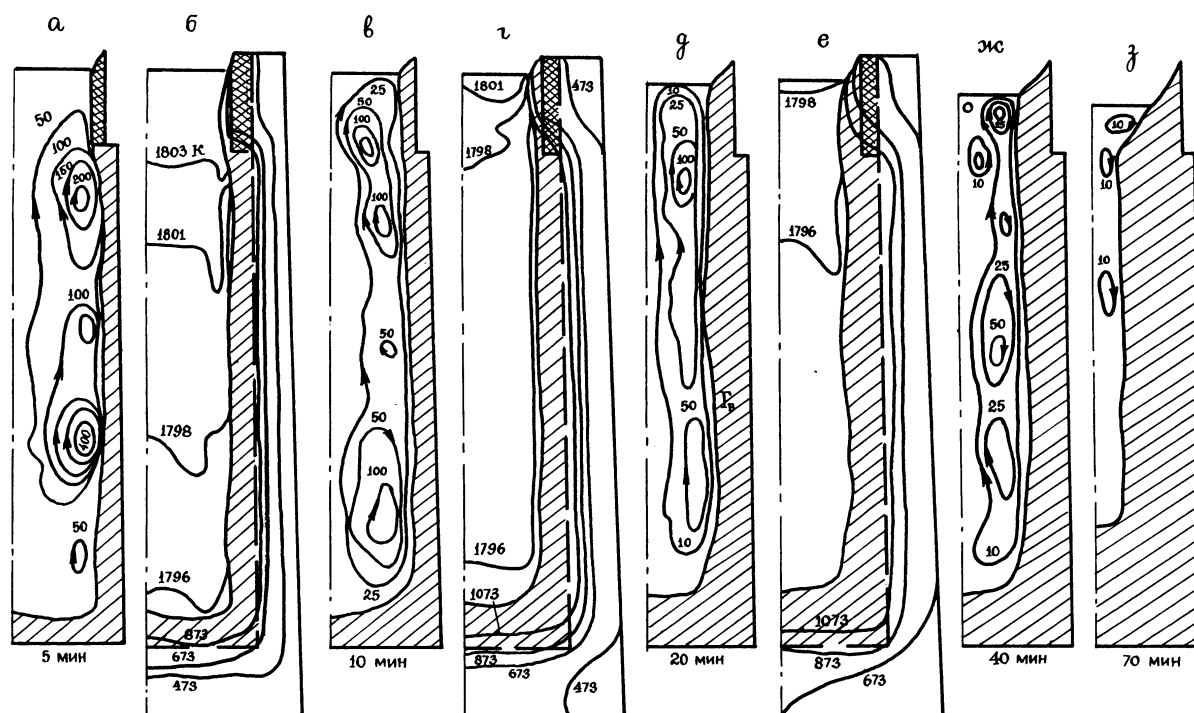


Рис.4.1. Распределение изолиний функции тока (а, в, д, ж, з) и изотерм (б, г, е) для уширенного кнizu слитка, утепленного шамотным вкладышем при тепловой конвекции

4.2. Гидродинамика процесса

В развитии естественного конвективного движения в затвердевающем уширенном кнizu или кверху слитке можно также выделить две основные фазы: активную и ползущего течения. Активная фаза в свою очередь может быть представлена двумя режимами: разгона до максимального значения скорости движения расплава и резкого спада. Режим разгона составляет 1-2

мин, режим спада 9-12 мин, т.е. активная фаза соответствует 9-10% от полной продолжительности затвердевания слитка [1].

Для оценки зависимости интенсивности конвекции по высоте слитка рассчитывается величина средней плотности кинетической энергии расплава E_K/E_{km} (E_{km} – максимальное значение плотности кинетической энергии) для подприбыльной, центральной и придонной частей. Резкое падение интенсивности в придонной части слитка обусловлено устойчивой температурной стратификацией расплава, вызванной скоплением здесь охлажденных масс расплава.

Анализ поведения линий тока (рис.4.1) позволяет классифицировать движение расплава в жидком ядре слитка как течение в вертикальном слое, особенностью которого является ячеистая крупномасштабная структура [2-12]. Подобного рода течение наблюдалось в экспериментальных [13] и численных [14] исследованиях тепловой конвекции в вертикальном слое. Возникновение вторичных вихрей связано с гидродинамической неустойчивостью подъемно-опускных течений [4]. В начале стадии затвердевания наиболее интенсивное движение происходит в центральной части слитка. Со временем вихри с максимальной интенсивностью локализуются в верхней половине слитка.

4.3. Тепловые процессы

В период активной фазы конвекции у бокового фронта затвердевания формируется тонкий тепловой слой с примыкающими к нему вытянутыми вдоль границы выливаемости узкими зонами более горячего расплава (рис.4.1). Образование этих зон обусловлено ячеистой структурой течения. По мере уменьшения интенсивности движения наблюдается уменьшение их протяженности. Сопоставление изотерм и изолиний функции тока показывает, что центры вихрей совпадают с зонами более горячего расплава.

Центры вихрей указывают на координаты точек, в которых смыкаются нисходящий конвективный поток и восходящий. Окрестности этих точек представляют собой локальные застойные зоны, в которых конвективный теплоперенос протекает менее интенсивно. Вогнутость некоторых изотерм в области нижнего угла изложницы является следствием наложения двух нестационарных процессов: прогрева и охлаждения угла поддона. Наиболее интенсивный прогрев изложницы наблюдается в течение 60-70 мин затвердевания. В дальнейшем ее энтальпия E_T , достигнув максимального значения, уменьшается. Скорость этого уменьшения незначительна. При резком возрастании E_T изложницы на начальных стадиях процесса затвердевания происходит только вследствие аккумуляции тепла слитка изложницей.

Стабилизация энтальпии свидетельствует о наступлении динамического равновесия изложницы с затвердевающим слитком, с одной стороны, и с внешней средой — с другой стороны. На этой стадии затвердевание происходит в результате теплообмена с окружающей средой.

Влияние конвекции сказывается в некотором повышении E_T изложницы и снижении ее в теле слитка. Энтальпия прибыли при этом в стадии активной фазы и «ползущего» течения повышается. Последнее обусловлено дополнительным притоком тепла из тела слитка за счет осевого восходящего потока [9].

4.4. Кинетика затвердевания

Конвекция играет значительную роль в перестройках температурного поля именно в незатвердевшей части слитка. Температурный интервал, в котором существуют тепловая конвекция и конвективный теплоперенос, невелик (1806-1793 К). Соответствующий ему интервал энтальпии составляет 0.7% от исходной энтальпии всей системы слиток – изложница – вкладыш. Следовательно, конвективный теплоперенос при используемых перегревах не может оказать значительного влияния на интегральные тепловые характеристики всей исследуемой системы. Вместе с тем, переход металла из жидкого состояния в твердое через двухфазное происходит на температурном интервале, величина которого соизмерима с температурным интервалом существования конвекции. В связи с этим следует ожидать, что именно кинетика затвердевания является наиболее чувствительной к влиянию конвекции посредством перестроек температурного поля в жидкой и жидко-твердой частях слитка. Этот вывод подтверждается результатами расчета вариантов затвердевания с учетом и без учета конвекции.

Интенсификация теплоотвода конвективным движением приводит к тому, что к моменту ~ 60 мин от начала затвердевания перегрев почти полностью снимается и, следовательно, скачкообразно развивается ДФЗ. Рост ширины ДФЗ вследствие конвекции следует рассматривать как отрицательный фактор, повышающий физическую неоднородность слитка (пористость, вторичные усадочные раковины и др.).

Влияние конвекции на механизм развития ДФЗ можно также оценить по распределению доли твердой фазы вдоль вертикальной оси (рис.4.2). До начала стадии ускоренного затвердевания на линейном участке ДФЗ ($\xi = 0.44 \div 0.95$) в обоих вариантах производная $(\partial \xi / \partial y)$ практически была одинакова и слабо зависела от времени. Конвективный перенос на этой стадии играет большую роль для участка ДФЗ в пределах границы выливаемости, а также в слоях, непосредственно примыкающих к ней [10]. К началу ускоренного затвердевания в варианте с учетом конвекции ДФЗ занимает всю незатвердевшую часть слитка и распределяется достаточно равномерно, причем значения ζ намного выше, чем в случае отсутствия конвекции.

Наличие точек перегиба на кривых распределения ζ является свидетельством возможности образования замкнутых полостей, которые в конечной стадии затвердевания трансформируются в закрытые усадочные раковины, поэтому для практики важно исследование кинетики границы питания в зависимости от конвекции, конфигурации слитка, интенсивности утепления и пр. Установлено, что момент смыкания линии питания с осью слитка, уши-

ренного книзу, в варианте с конвекцией наступает ~ на 6 мин раньше по сравнению с вариантом без конвекции, при этом протяженность образовавшейся замкнутой полости уменьшилась примерно в два раза.

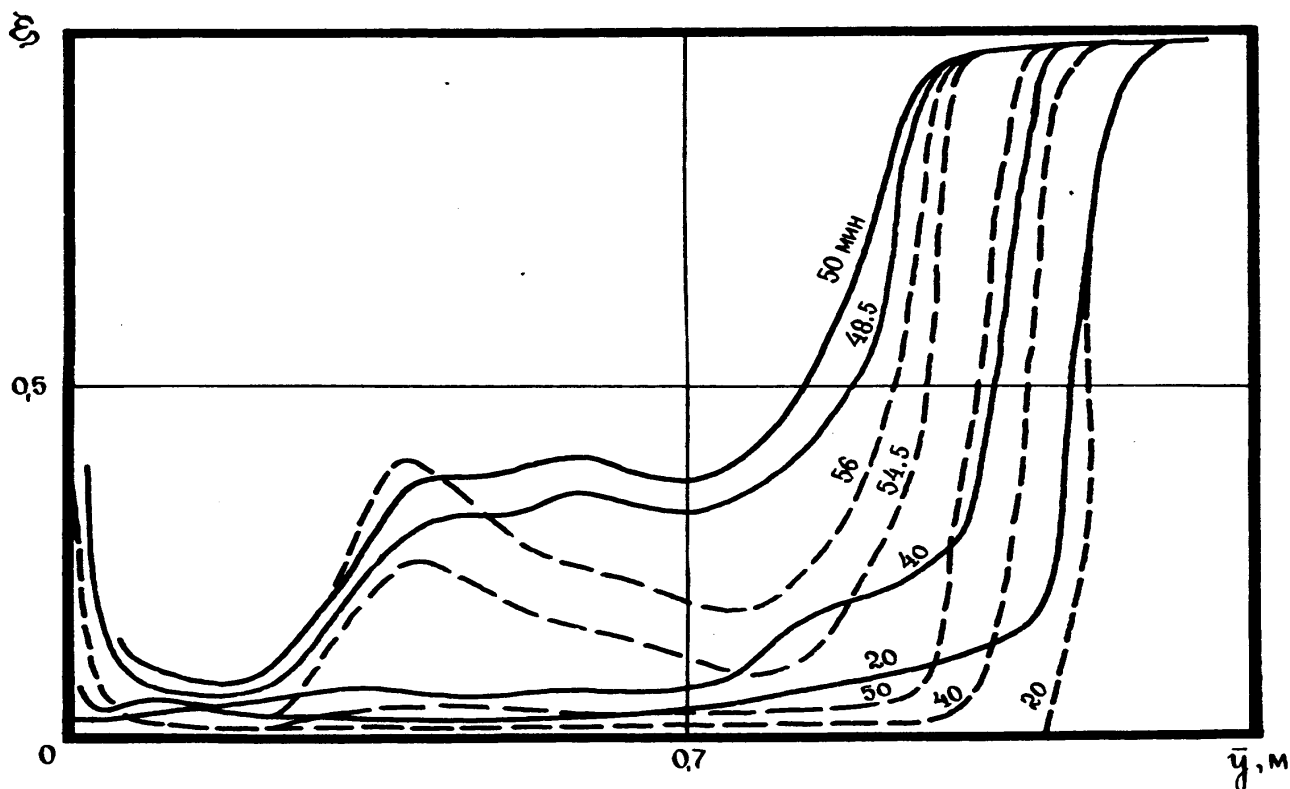


Рис.4.2. Распределение доли твердой фазы для ушренного книзу слитка при $x = 0$;
1 – $Gr_T = 0$; 2 – $Gr_T \neq 0$

4.5. Формирование усадочных раковин

Процессы охлаждения и кристаллизации металла, как правило, сопровождаются уменьшением его объема, т.е. усадкой. В слитках это приводит к образованию усадочных раковин и усадочных дефектов (рыхлостей, пористости и т.д. в различных объемах тела слитка в зависимости от условий теплоотвода). Они образуются в местах, в которых металл застывает в последнюю очередь. При конструировании слитков стараются сконцентрировать усадочную раковину в определенном месте, как правило, в головной части слитка (прибыльной части), которая в дальнейшем отделяется от здорового металла и идет в обрезь.

Различают открытую усадочную раковину, которая сообщается с атмосферой без перекрытия ее мостом металла, и закрытую, отделенную от атмосферы мостом металла. Схемы к расчету размеров таких раковин приведены на рис. 4.4. Нас интересуют размеры открытой усадочной раковины в слитке. Такие раковины образуются либо при разливке стали сифонным способом под теплоизолирующей смесью (наш случай), либо при скоростной разливке стали сверху с последующим закрытием зеркала металла теплоизолирующими смесями.

Уменьшение объема кристаллизующегося сплава принято характеризовать коэффициентом объемной усадки (объемного сжатия) $n = \rho_T / \rho_{ж} - 1 = 0,11$ (ρ_T и $\rho_{ж}$ – соответственно плотности твердой и жидкой фаз металла). Расчет усадки производится в процессе кристаллизации слитка как изменение объема жидкого металла в объеме прибыльной вставки, а глубина усадочной раковины – как разность ординат уровня налива и минимального расчетного уровня профиля усадочной раковины.

При расчете от начального уровня налива жидкого металла каждому моменту времени в процессе затвердевания слитка соответствует уровень жидкого металла в прибыльной части, понижающийся за счет расходования жидкого металла на питание усадки. Точка пересечения фронта кристаллизации с уровнем жидкого металла дает координату профиля усадочной раковины.

Рассмотрим схему расчета величины усадочной раковины на примере двухмерной задачи. В этом случае ось Oy располагают по оси слитка, а ось Ox по уровню налива металла (рис. 4.3, а).

Объем затвердевшего металла при решении двухмерной задачи соответствует площади, ограниченной внешней границей слитка и границей фронта кристаллизации.

Пусть линия $A_0A_1A_4$ отражает положение фронта кристаллизации в момент времени τ_1 . координаты ее характеризуются координатами точек ε_1 , h_1 , определяемыми на основании решения уравнения теплопередачи при условии нахождения в точке 90 % твердой фазы. Положение нижней точки A_4 линии характеризует глубину жидкой лунки от уровня налива (11).

На образование твердой фазы между внешней границей слитка и границей фронта кристаллизации (линия $A_0A_1A_4$) в количестве $V_{Тм1}$ затрачивается объем жидкого металла $\Delta V_{ж1}$, равный $\Delta V_{ж1} = V_{Тм1} \rho_T / \rho_{ж}$. Тогда усадка расплава составит: $\Delta V_1 = V_{ж} - V_{Тм1} \cdot (\rho_T / \rho_{ж} - 1)$. Отсюда ордината точки A_1 или опустившийся в прибыльной части вследствие питания усадки уровень жидкого металла h_1 определится из выражения $h_1 = \Delta V / \varepsilon_1 / x_0$ (x_0 – характерный размер).

В момент времени τ_2 фронт кристаллизации переместится в положение, определяемое линией $A_0A_2A_4$. Объем затвердевшего металла в этом случае соответствует площади, ограниченной кривой $A_0A_1A_2A_3$ и внешней границей слитка. При этом точка A_3 характеризует глубину жидкой лунки от уровня налива (12).

На образование твердой фазы металла объемом $V_{Тм}$ так же, как и в предыдущем случае, затрачивается объем жидкого металла $V_{ж2} = V_{Тм2} \rho_T / \rho_{ж}$. тогда усадка расплава за промежуток времени τ_2 от начала затвердевания составит $\Delta V_2 = V_{ж} - V_{Тм2} \cdot (\rho_T / \rho_{ж} - 1)$, а уровень жидкого металла h_2 определится из выражения $h_2 = \Delta V_2 / \varepsilon_2 / x_0$ (x_0 – характерный размер).

Усадка каждого последующего расчетного цикла затвердевания определяется аналогично. При этом после каждого последующего цикла расчета величина l_i – уменьшается, а h_i – увеличивается, двигаясь навстречу друг другу.

На последнем расчетном этапе затвердевания эти величины совпадают, определяя, таким образом, глубину открытой усадочной раковины.

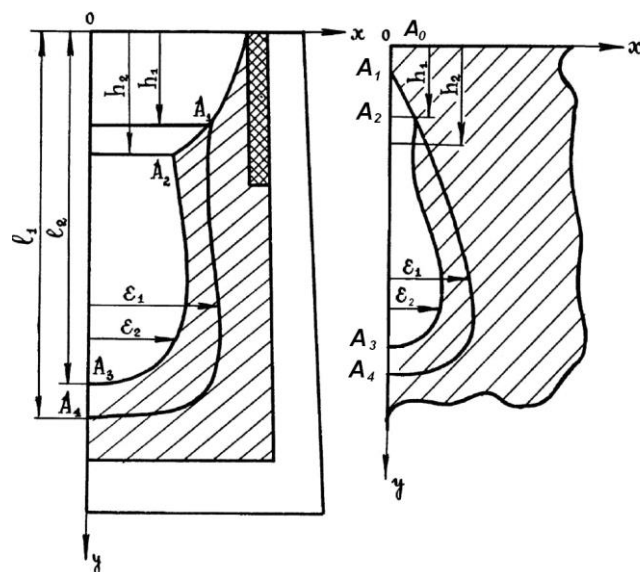


Рис. 4.3. Схема к расчету открытых (а) и закрытых (б) усадочных раковин

Для расчета закрытой усадочной раковины начало координат помещается в точку смыкания боковых фронтов (границ питания) слитка (точка A_4) (рис. 4.3, б). При этом методика расчета остается такой же, как и для открытой усадочной раковины. Влияние конвективного теплопереноса при образовании открытой усадочной раковины сказывается в опускании ее поверхности, исключая осевую часть раковины [16].

В период наиболее активного движения расплава из осевых зон тела слитка восходящими конвективными потоками осуществляется полная компенсация потерь тепла прибылью через вкладыши, а после снижения ее интенсивности – частичная. Это сдерживает рост от вкладышей твердой корочки и приводит к образованию характерной кромки по периферии открытой усадочной раковины.

Размеры закрытой усадочной раковины зависят от объема незатвердевшего металла, заключенного в полости ниже точки смыкания.

4.6. Расчет усадочной раковины при различных технологических параметрах разливки слитка

Глубина открытой усадочной раковины (УР) трубных слитков, отливаемых в сквозные, уширенные книзу изложницы без дополнительного бокового утепления прибыльной части, оказывает существенное влияние на качество внутренней поверхности труб.

Металлургические заводы, специализирующиеся на отливке трубных (без бокового утепления головной части) слитков, для уменьшения глубины

усадочной раковины производят отливку слитков с минимальными линейными скоростями в сочетании с элементом технологии – «подкачка».

Эти технологические параметры отливки слитков преимущественно определены опытным путем, без прогнозирования глубины УР. Для прогнозирования параметров УР необходимо регламентировать продолжительность отливки слитка при заданной температуре металла в сталеразливочном ковше и продолжительность «подкачки» (объем доливаемого металла).

Продолжительность отливки и «подкачки» заданного слитка определяется температурой металла в ковше и маркой стали. «Подкачка» слитка производится в течение 1,0 – 2,0 мин после отливки слитка, т. к. в это время имеет место большая усадка металла до 1,5% от массы слитка.

Для оценки влияния этих факторов на протяженность УР разработана математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов в период разлива металла в изложницу и дальнейшего его формирования в ней. Модель также позволяет рассчитать объем открытой и закрытой усадочных раковин в период затвердевания расплава

Таблица 4.2

Уровень наполнения, м	Время заливки, мин	ДТФ после заливки, %	Объем долива после 1,5 мин. выдержки, л	Объем открытой УР, м ³	Объем закрытой УР, м ³
1,55	10,5	0,45	2,78	0,0059	0,0039
1,55	10,5	0,45	не доливался	0,00911	0,0035
1,55	13,5	0,52	2,08	0,00486	0,0039
1,55	13,5	0,52	не доливался	0,00781	0,00304
2,05	15,5	0,57	1,88	0,00575	0,00528
2,05	15,5	0,57	не доливался	0,00821	0,00469
2,05	12,5	0,50	2,82	0,00657	0,00587
2,05	12,5	0,50	не доливался	0,00939	0,00587

Были просчитаны несколько вариантов для различного уровня наполнения изложницы (высота слитка 2,05 м и 1,55 м, диаметр основания – 0,455 м) с различным временем наполнения (см. таблицу 4.2, рис. 4.4). После окончания заливки и образования усадочной раковины, доливался расплав равный по объему УР в течение 1,5 мин. В ходе многовариантных расчетов, получены значения открытых и закрытых усадочных раковин, сведенные в таблицу при обычном получении слитка и при доливке расплава.

Приведенные результаты расчета показывают, что глубина УР уширенного книзу заданного слитка без дополнительного бокового утепления при прочих равных условиях зависит от продолжительности его отливки и «подкачки». Влияние "подкачки" более существенно, т. к. она уменьшает более чем на 30% объем открытой, но увеличивает на 7 – 8% объем закрытой усадочной раковины.

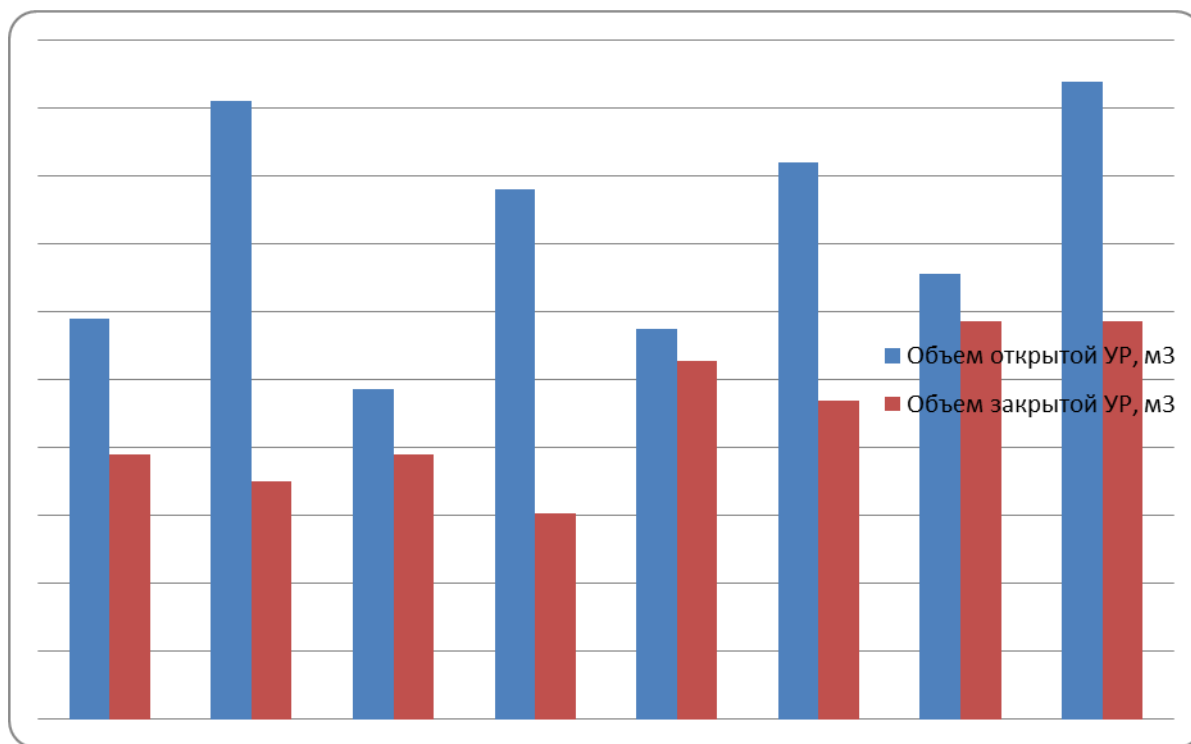


Рис. 4.4. Диаграмма расчета усадочной раковины при различных технологических параметрах разливки слитка

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет прогнозировать размеры УР круглых уширенных книзу (без бокового утепления головной части) слитков путем корректировки технологических параметров их отливки (продолжительности отливки и "подкачки").

4.7. Анализ технологических процессов производства слитков колесной стали

В последние годы на ОАО «ИНТЕРПАЙП НТЗ» созданы новые прогрессивные технологические процессы выплавки, отливки в слитки и охлаждения колесной стали различных марок. В частности, внедрены в массовое производство технология отливки колесных слитков в стальные круглые изложницы, производство 6-ти и 8-ми заготовочных слитков, отливаемых в круглые чугунные и стальные изложницы.

Однако до настоящего времени экспериментально не решены вопросы оптимизации параметров разливки стали в круглые изложницы и продолжительности их охлаждения в литейной форме для снижения брака колёс по дефектам металлургического происхождения и возможности уменьшения продолжительности цикла разливки, охлаждения слитков колесной стали при отливке как в чугунные, так и в стальные изложницы. Решение этих задач позволит, с одной стороны, экономить энергоресурсы при производстве стали, с другой стороны – уменьшить загруженность оборудования для обслуживания технологических процессов.

В настоящее время известны общие закономерности влияния на качество слитка начальной температуры и продолжительности разливки стали в чугунные и стальные изложницы, длительности охлаждения слитка в изложнице. Эти процессы тесно связаны между собой и установить их оптимальные параметры сложная научно-техническая задача.

Определение влияния начальной температуры и продолжительности разливки стали в круглые слитки, затвердевания слитка в чугунной и стальной изложнице, и выбор оптимальных параметров производства отливок на основе экспериментальных исследований – длительный, дорогостоящий и трудоемкий процесс.

Выплавка колесной стали различных марок в мартеновской печи завода «ИНТЕРПАЙП НТЗ» регламентируется технологической инструкцией ТИ НТЗ-М-01-2005 «Выплавка стали в мартеновском цехе», в которой изложены требования по обеспечению выплавки стали, удовлетворяющие соответствующим стандартам и техническим условиям, установлены требования к сырью, различным материалам, топливу, используемых в процессе выплавки стали.

Регламент технологических операций и порядок их выполнения при обработке металла на установке внепечной обработки стали (УВОС), метрологическое обеспечение, ведение документации, нормы и правила техники безопасности, а также требования к ферросплавам, шлакообразующим и другим материалам изложены в технологической инструкции ТИ НТЗ-М-03-2004 «Обработка металла на установке внепечной обработки стали (УВОС) в мартеновском цехе».

Производство слитков колесной стали регламентируется технологической инструкцией ТИ 243-М-02-200 «Разливка стали в изложницы». В инструкции изложен порядок подготовки оборудования к разливке металла, сформулированы требования к технологии разливки металла, технологические операции и порядок их выполнения, метрологическое обеспечение.

Требования к подготовке сталеразливочных составов, технологические операции и порядок их выполнения, контроль, ремонт и отгрузка 8-ми заготовочных слитков колесных марок стали, отливаемых в круглые чугунные и стальные изложницы, метрологическое обеспечение, регламентируются технологической инструкцией ТИ НТЗ-М-04-2007 «Подготовка сталеразливочных составов в мартеновском цехе. Контроль и ремонт слитков». В инструкции также регламентированы режимы охлаждения слитков в изложнице и разливки их для дальнейшего охлаждения на воздухе.

Химический состав транспортного металла приводится в технологических картах на выплавку, внепечную обработку и разливку стали.

Химический состав колесной стали, исследованной в настоящей работе приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3. Химический состав исследуемой колесной стали

№№ пп	Марка стали	Содержание химических элементов, масс. %%											
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Al	[H]
1.	КП-2	0,57- 0,63	0,65- 0,85	0,25- 0,42	≤0,020	≤0,018	≤0,25	≤0,25	≤0,25	<0,10	<0,08	0,010- 0,030	≤2,0 ppm
2.	КП-Т	0,65- 0,68	0,70- 0,90	0,25- 0,40	≤0,025	≤0,020	0,15- 0,30	0,10- 0,25	≤0,30	0,08- 0,15	<0,08	0,013- 0,030	≤2,0 ppm
4.	R 7	0,46- 0,49	0,65- 0,76	0,25- 0,37	≤0,018	≤0,013	0,18- 0,25	<0,25	<0,25	<0,05	-	0,015- 0,030	≤2,0 ppm
4.	R 8	0,51- 0,55	0,65- 0,76	0,25- 0,37	≤0,018	≤0,013	0,18- 0,25	≤0,25	≤0,25	0,01- 0,03	-	0,015- 0,030	≤2,0 ppm

Комплекс «печь-ковш – вакууматор» (LHF-VD) предназначен как для подготовки металла к вакуумированию, так и для подогрева металла, корректировки его химического состава и дополнительного легирования без последующего вакуумирования.

На установке «печь-ковш» выполняют следующие технологические операции:

- отбор проб и замер температуры металла;
- наведение высокоосновного металла, жидкоподвижного шлака, что способствует устойчивой работе печи и процессу десульфурации металла;
- корректировку химического состава металла по легирующим элементам и легирование металла новыми элементами, не содержащимися в металле при поступлении его на «печь-ковш»;
- десульфурацию металла.

На вакууматоре выполняют следующие технологические операции:

- отбор проб для контроля химического состава металла;
- замер температуры металла;
- вакуумирование металла с целью снижения содержания водорода;
- корректировку химического состава;
- микролегирование и модифицирование металла сильными нитридообразующими элементами (титаном, ванадием, бором, алюминием, ниобием);
- глубокое раскисление и модифицирование металла алюминием и силикокальцием;
- очистительную продувку аргоном после ввода алюминия;
- измерение содержания водорода непосредственно в жидком металле с помощью системы «Hydris»;
- нанесение на шлак утепляющих материалов (для уменьшения тепловых потерь в процессе разливки стали).

Снижение температуры металла при вакуумировании составляет 1,8 – 2,5 °С/мин в зависимости от расхода аргона (ориентировочно 45 – 60°С за цикл обработки).

Температура транспортного металла перед подачей ковша на разливку должна находиться в пределах 1545 – 1565 °С. При превышении указанной температуры необходимо осуществить корректирующую продувку аргоном.

Для разливки стали в изложницы в мартеновском цехе при проведении НИР использовано следующее сменное оборудование:

- поддоны шестиместные для установки изложниц КП-8 с торцованной поверхностью;
- поддоны двухместные для установки изложниц КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке;
- поддоны с “Ж” – образным расположением каналов сифонной проводки;
- изложницы КП-8 для отливки 8-ми заготовочных слитков (патент Украины 72678 «слиток»), изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке;
- центровые для наборки составов с изложницами КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке;
- крышки для установки на изложницы КП-8, изготовленные по чертежам, разработанным и утвержденным в установленном порядке;
- крышки 4-х местных для установки на изложницы КП-8 на 2-х местных поддонах.

При подготовке сталеразливочных составов на каждой платформе набирали по 2 куста из 6-ти изложниц. В кусте изложницы расположены по радиусу. Состав состоял из 4-х платформ и платформы с одним или двумя двухместными поддонами.

Изложницы КП-8 подготовленного транспортного сталеразливочного состава накрывают крышками с «лючками» из листовой стали.

Для состава под разливку транспортного металла в изложницы КП-8 подвешивают пакет с теплоизолирующей смесью с помощью киперной ленты или шпагата таким образом, чтобы обеспечить подвешивание пакета на высоте 50 – 70 мм от поверхности поддона и центрируют пакет по оси изложницы. Использование проволоки для подвески пакетов не допускается.

При вводе в эксплуатацию состава для разливки транспортного металла с новыми изложницами необходимо проведение промывочной плавки.

Подготовленный сталеразливочный состав не позднее, чем за 30 минут до выпуска плавки подают в разливочный пролет.

Разливка колесной стали производится сифонным способом в сквозные 8-ми заготовочные изложницы КП-8 (патент Украины № 72678 «слиток») круглого сечения, установленные на подвижных сталеразливочных составах, из 120 тонных сталеразливочных ковшей. Ковши оборудованы шибберными затворами (жёсткого и модульного типов) и продувочными узлами (фурмами

и соплами). Использовано комплексное утепление слитка теплоизолирующими смесями и утепляющими вставками с использованием защиты струи металла аргоном.

Изложницы изготовлены из чугуна марки СЧ 15 и стали марки Ст 20. Геометрические параметры изложниц приведены на рис. 4.5.

Для утепления слитков в изложницы после чистки, продувки сжатым воздухом и осмотра на наличие недопустимых дефектов устанавливали теплоизолирующие вставки МКРВ-340, соответствующие типоразмерам изложниц (таблица 4.4, рис.4.6).

Таблица 4.4. Размеры утепляющих вставок в изложницы для отливки колесного металла

Изложница	Тип изложниц	Номер изделия	Размеры вставки, мм					
			L	R	a	b	C	α°
Колесная	КП-6	№ 6	735	240	290	20	5	60
Колесная	КП-8	№ 10	791	252	220	20	10	60

Непосредственно перед разливкой производят выдержку металла в ковше. Продолжительность выдержки металла в ковше (для стабилизации температуры разливки) определяется мастером разливки, в зависимости от температуры стали. Температура металла, замеряется термопарой погружения после выпуска плавки в одном из ковшей, фиксируется АСУ ТП мартеновской печи и отображается на цифровом табло. Температурные потери в ковше за время выдержки ориентировочно составляют 1 – 2 °С/мин в течение первых 10 – 20 мин выдержки плавки стали в ковше.

Скорость разливки колесной стали зависит, в основном, от температуры металла и регулируется разливщиком в соответствии с технологической инструкцией по принципу: при минимальной для данной марки стали температуре металла скорость разливки максимальна и наоборот.

В начальный период разливка ведётся интенсивно, донная часть изложниц на высоту 80 – 100 мм, должна наполняться в течение 25 – 30 сек, а в дальнейшем – с линейной скоростью 160 – 220 мм/мин. Время наполнения прибыльной части слитков бандажных и трубных марок сталей производится замедленно, в течение 2 – 3 мин., но не менее 2-х мин.

Общая продолжительность наполнения 8-заготовочных изложниц (патент Украины № 72768 «Слиток») 16 – 18 мин в зависимости от температуры металла (ТИ НТЗ-М-02-2005-1, пп 7.4.7, 7.4.8).

При разливке стали в изложницы с теплоизолирующими вставками при подходе металла на 50 – 100 мм до вставки, скорость разливки уменьшают примерно вдвое, с целью предотвращения подворотов у стенок изложницы утепляющей смеси.

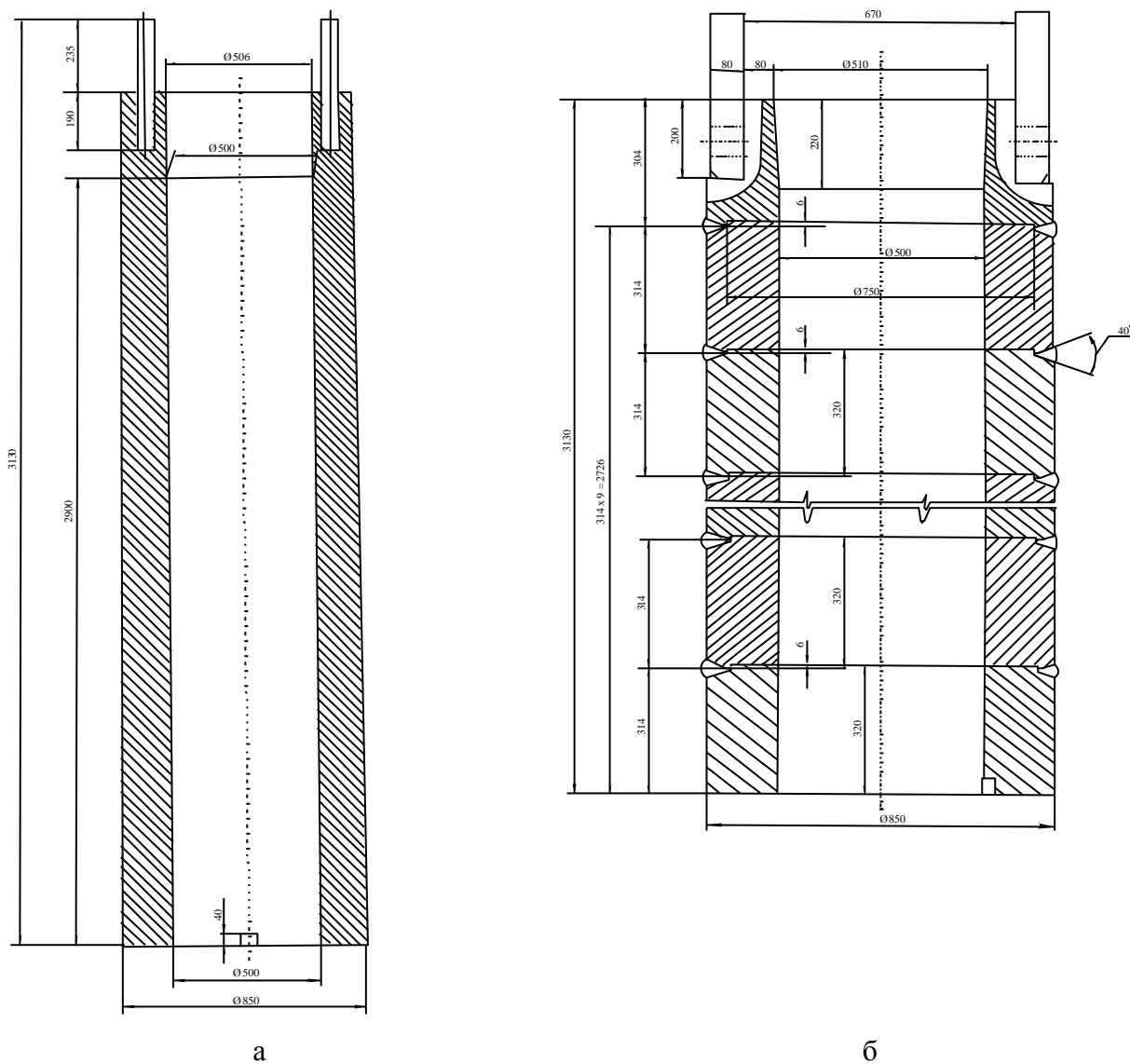


Рис.4.5. Геометрические параметры чугунной (а) и стальной (б) изложниц

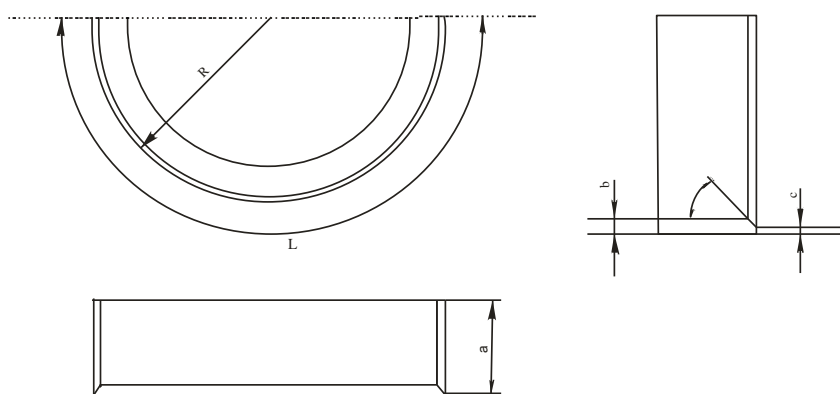


Рис.4.6. Теплоизолирующие вставки МКРВ-340.

После наполнения второго поддона с каждого ковша отбирают пробу металла на ковшевой химический анализ.

При измерении содержания водорода системой «ХАЙДРИС» пробы для определения содержания водорода не отбираются.

После окончания разливки продолжительность выдержки сталеразливочных составов со слитками колёсных марок стали в разливочном пролёте и до начала раздевания слитков приведена в табл. 4.5 (ТИ НТЗ-М-04-2004).

Таблица 4.5. Продолжительность выдержки сталеразливочных составов в разливочном пролёте и до начала раздевания слитков (для изложниц КП-6, КП-8)

№№ п.п.	Марка стали	Продолжительность выдержки сталеразливочного состава, час-мин	
		в разливочном пролёте	до начала раздевания
1	КП-1	1-00	4-00
2	B2, B2N; B3N; B5; B5E; B5T; B6E; B6T; B7E; БЛ-2.	0-40	4-00
3	КП-2; 3; Т; R1N; R6T; R7T; R8T; R9T; Класс«В»; Класс «С».	0-40	4-00

Таблица 4.6. Метрологический контроль за технологическим процессом

Наименование процессов, место отбора пробы или измерения	Наименование контролируемого параметра	Рабочий диапазон контролируемого параметра	Периодичность контроля	Наименование и тип средства измерения или метода измерения	Погрешность средства измерения или метода измерения	Место регистрации параметров
Сталеразливочный ковш	Температура футеровки, °С	500-1200	Ежеплавочно	Лазерный пирометр Raynger МХ 4	± 1 % или 1°С	Паспорт плавки
Сталеразливочный ковш	Расстояние от шлака до верхней кромки ковша, мм	500-1000	Перед вакуумированием	Визуально, по кирпичам кладки ковша	-	Паспорт плавки
Сталеразливочный ковш	Температура металла, °С	1450-1660	Ежеплавочно	Блоки тип ТРП-0290М Вторичный пр. тип DIGI-T/DTK	± 7°С	Паспорт плавки
Сталеразливочный ковш	Удельный расход аргона при	0-500	Ежеплавочно	ARK – 500 TZA – 4	± 1 % ± 1 %	Паспорт плавки

	продувке, л/мин.					
Вакууматор	Текущий уро-вень металла в ковше, мм	800- 1000	В процессе вакуумиро- вания	Визуально	-	-
Присадки легирующих и шлакооб- разующих	Масса, кг	0-1000	Ежеплавочно	Весо- дозирову- ющий комплекс	$\pm 1\%$ от НПД	Паспорт плавки
Газонасы- щен-ность стали	Содержа- ние водо- рода в ста- ли, ppm	0,5-10,0	Ежеплавочно	Система "Hydris"	$\pm 0,4$ ppm	Паспорт плавки

После разливки стали в изложницы и выдержки в разливочном пролете сталеразливочный состав с изложницами выдерживают на технологических путях или подают в пролет подготовки составов.

Раздевание слитков всех типов и марок стали производят в том же порядке, в каком производилась разливка.

Метрологический контроль технологического процесса приведен в таблице 4.6.

После охлаждения ОТК отслеживает идентификацию слитков, производит их маркировку и контролирует передачу на промсклад мартеновского цеха для отбраковки, ремонта и послиточной маркировки для передачи цеху-потребителю.

Слитки, поставляемые из мартеновского цеха в колесопрокатный цех, не должны иметь продольных и поперечных трещин, плен, поясов, заворотов, подкорковых пузырей, "голенищ", свищей, а также "рослость". Не допускаются к поставке в прокатные цеха "рослые" слитки, слитки, отлитые в изложницы сверху и с глубиной удаления дефектов на слитках более 30 мм (ЗТУ 27.1-05393116-525-2005, ЗТУ 27.1-05393116-522-2003).

4.8. Теплофизические параметры разливаемой стали, литейной формы и утеплительных материалов

Численный эксперимент проводили для слитков диаметром 500 мм и высотой 3130 мм, отливаемых из стали марок КП-2, КП-Т, R7, R8 в чугунную (чугун марки СЧ 15) (рис.4.5,а) и стальную (марка стали Ст 20) (рис.4.5,б) изложницы. Теплофизические параметры колесной стали, материала изложниц и утеплителей приведены в таблицах 4.7, 4.8, 4.9 [17]:

Таблица 4.7. Теплофизические параметры стали КП2

№/	Параметр	Значение	№/	Параметр	Значение
----	----------	----------	----	----------	----------

№		численное	Размерность	№		численное	Размерность
1	Теплопроводность жидкой стали КП-2	$\lambda_{ж}=27,1$	Вт/мК	5	Плотность жидкой стали КП-2	$\rho_{ж}=7000$	Кг/м ³
2	Теплопроводность твердой стали КП-2	$\lambda_{т}=33,9$	Вт/мК	6	Плотность твердой стали КП-2	$\rho_{т}=7620$	Кг/м ³
3	Начальная температура расплава	$T_0=1550$	°С	7	Теплоемкость жидкой стали КП-2	$c_{ж}=699$	$\frac{Дж}{кгК}$
4	Температура ликвидус	$T_L=1474$	°С	8	Теплоемкость твердой стали КП-2	$c_{т}=578$	$\frac{Дж}{кгК}$

Таблица 4.8. Теплофизические параметры чугуна (СЧ 15) и стальной (СТ 20) изложниц

№/№	Параметр	Значение		№/№	Параметр	Значение	
		численное	размерность			численное	размерность
1	Высота изложницы	$L_z=3130$	мм	6	Температура нагрева изложницы	$T_{из}=50$	°С
2	Внешний диаметр изложницы	$L_{r1}=850$	мм	7	Внутренний диаметр изложницы	$L_{r2}=500$	мм
3	Теплопроводность чугуна изложницы	$\lambda=38,4$	Вт/мК	8	Теплопроводность стальной изложницы	$\lambda=51$	Вт/мК
4	Плотность чугуна изложницы	$\rho_{т}=7800$	кг/м ³	9	Плотность стальной изложницы	$\rho_{т}=7900$	кг/м ³
5	Теплоемкость чугуна изложницы	$c_{из}=541$	$\frac{Дж}{кгК}$	10	Теплоемкость стальной изложницы	$c_{из}=480$	$\frac{Дж}{кгК}$

Таблица 4.9. Геометрические и теплофизические параметры теплоизолирующих материалов

№/№	Параметр	Значение		№/№	Параметр	Значение	
		численное	Размерность			численное	Размерность
1	Высота вкладыша	200, 220, 250, 270	мм	3	Плотность вкладыша	$\rho_{т}=2000$	Кг/м ³
2	Теплопроводность вкладыша	$\lambda_{ж}=2$	Вт/мК	4	Теплоемкость вкладыша	$c_{ж}=1380$	$\frac{Дж}{кгК}$

4.9. Адаптация математической модели

Для оценки точности результатов расчета выполнены экспериментальные измерения глубины жидкой лунки по оси слитка в процессе его затвердеваний (после окончания отливки), исследования глубины усадочной раковины в 8-ми заготовочных слитках стали КП-2, изменение температуры поверхности стальной и чугунной изложниц при разливке и затвердевании слитков колесной стали.

Глубину усадочной раковины в головной части слитков колесной стали определяли на произвольно отобранных после порезки и поломки головных частей от 12 слитков четырех плавов (по три от каждой плавки).

Время наполнения прибыли колесного слитка по ТИ НТЗ-М-02-2005-1 п.7.4.7 составляло 2 – 3 мин, (скорость 70 – 120 мм/мин). Уровень наполнения прибыли металлом был ниже верхней кромки вставок, примерно на толщину слоя утеплительной смеси 50 мм.

После осмотра и обмера геометрических параметров выборочно выполнена порезка по оси головных частей (осевое сечение) огневым способом.

Результаты замеров приведены в таблицах 4.10 и 4.11 и на рис. 4.4.

Таблица 4.10. Химический состав исследуемых плавов

№ плавки	Содержание химических элементов, масс. %										Температура разливки, °С
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	V	
31527	0,65	0,83	0,34	0,009	0,010	0,28	0,11	0,05	0,023	0,083	1554
32526	0,67	0,82	0,30	0,012	0,009	0,28	0,10	0,04	0,024	0,093	1554
32527	0,66	0,82	0,34	0,013	0,008	0,27	0,11	0,05	0,023	0,083	1554
31526	0,65	0,83	0,34	0,009	0,010	0,28	0,11	0,05	0,023	0,083	1554

Общий вид и макроструктура головных частей (усадочных раковин) слитков приведены на рис.4.8.

Результаты показывают, что глубина усадочной раковины от кромки короны до дна открытой усадочной раковины составляет от 20 до 160 мм при высоте от кромки короны до тела слитка 130 – 190 мм.

Ниже дна усадочной раковины следов усадки нет, металл плотный.

Характер усадочных раковин и структура металла под уровнем открытой усадочной раковины свидетельствуют о том, что температурный и скоростной режимы разливки, конструкция слитка и величина теплоизолирующей вставки, а также применяемые смеси обеспечивают надлежащее качество металла тела слитка.



Рис. 4.8. Усадочные раковины в 8-ми заготовочных слитках колесной стали

В численном эксперименте глубина усадочной раковины рассчитывалась при условии наполнения прибыли металлом до верхней кромки утепительной вставки (торца изложницы). В применении к практике необходимо учитывать, что уровень налива металла примерно на 40 – 50 мм ниже верхней кромки слоя шлаковой смеси, выходящей в прибыль. В процессе кри-

сталлизации уровень металла во вставке опускается примерно на 50 мм, образуя уровень кромки «короны» прибыльной части затвердевшего слитка.

Полученные данные показали, что в условиях производства при колебаниях продолжительности отливки слитков в пределах от 12 до 18 мин глубина открытой усадочной раковины не опускается ниже уровня утеплительной вставки.

Таблица 4.11. Параметры усадочной раковины в головных частях 8-ми заготовочных слитков колесной стали массой 4,2 тонны

№ плавки	Условный номер заготовки в партии слитков	Высота от кромки короны до реза Н ₁ головной заготовки от тела слитка, мм	Высота от кромки короны до тела слитка, Н ₂ , мм	Высота от кромки короны до дна открытой усадочной раковины, Н ₃ , мм	Структура по разлому	Структура по поперечному огневому резу прибыльной части
31527	1	235	190	70	Следов усадочной раковины нет	Ниже дна усадочной раковины следов усадки нет, металл плотный
	2	235	160	160	Пятно шлака диаметром 30-35 мм	-
	3	230	180	70	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный
32526	1	210-220	130-140	120	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный В дне УР слой расплавленного шлака толщиной 6-8 мм
	2	250	160	90 – 100	Следов усадочной раковины нет	-
	3	230	180	80	Следов усадочной раковины нет	-
32527	1	240	140	100	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный
	2	250 – 260	160	100	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки визуально не обнаружено
	3	250	160	80	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный
31526	1	165	135 – 140	20 – 30	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный
	2	240	190	80	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный
	3	240	190	100	Следов усадочной раковины нет	Следов усадки нет, металл плотный

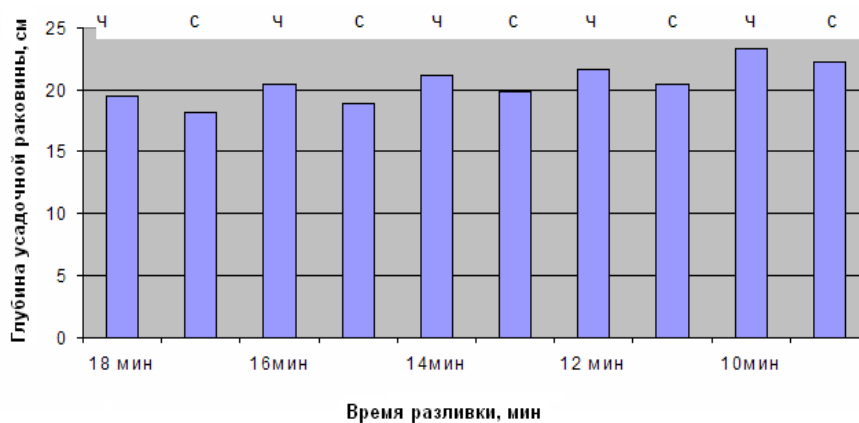


Рис. 4.8. Расчет глубины усадочной раковины при различном времени разливки стали. "Ч" и "С" – чугунная и стальная изложницы соответственно

Результаты численного эксперимента определения глубины открытой усадочной раковины в слитках отлитых в чугунные и стальные изложницы в течение 10 – 18 мин. при продолжительности наполнения прибыльной вставки высотой 220 мм в течение 120 – 160 сек показали, что во всем диапазоне исследования глубина усадочной раковины находится в пределах 180 – 240 мм, закономерно увеличиваясь при увеличении скорости разливки (рис. 4.8).

Следует отметить, что глубина усадочной раковины, полученная путем численного моделирования, является завышенной, так как не учитывается специфика поведения теплоизолирующей смеси, под которой производится отливка слитка, при подходе металла к прибыльной части.

Эта специфика состоит в том, что смесь не обладает идеальной жидкотекучестью. При подходе к нижнему торцу теплоизолирующей вставки и дальнейшем движении поверхности жидкого металла вверх смесь не успевает выйти в горизонтальном направлении из-под торца вставки (из-под заплечиков вставки) и остается под заплечиками в виде какого-то слоя конической формы с максимальным утолщением под торцом вставки. Слой этот обладает достаточно высокими теплоизолирующими свойствами, и в пределах этого теплоизолирующего кольца металл достаточно долго находится в жидкоподвижном состоянии.

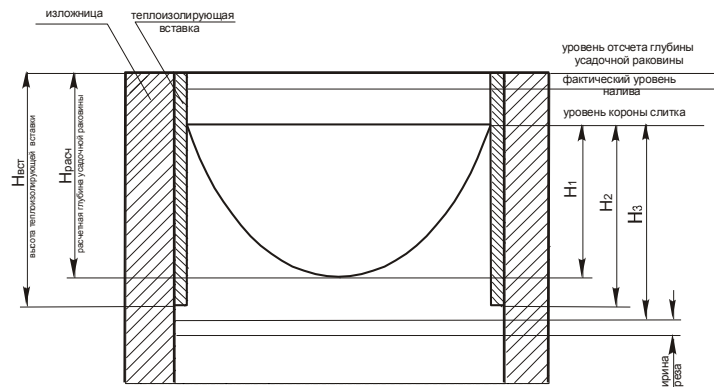
Подтверждением этому являются потеки жидкого металла на поверхности слитка, образующиеся при усадке его и нарушении сплошности этого шлакового кольца. Теплопроводность этого кольцевого пояса не поддается какому-либо определению и учету в теплопередаче от металла к стенке изложницы. В модели принимается теплопередача этого слоя эквивалентной теплопередаче от металла к стенке изложницы без посредников.

Результаты замеров, представленные в табл. 4.11 соответствуют приведенной на рис 4.9 схеме. Сравнение величин H_3 и H_2 свидетельствует о том, что за исключением одного случая (31527 – 2) дно усадочной раковины располагается выше тела слитка, т.е. усадочная раковина находится в пределах объема прибыльной части слитка. В шейке разлома между прибыльной ча-

стью слитка и головной заготовкой, находящейся в пределах 20 – 40 мм ниже прибыльной части следов усадочной раковины не обнаружено.

Таким образом, результаты математического моделирования достаточно надежны для использования их в практических выводах.

Затвердевание осевой зоны слитка оценивали путем погружения металлического стержня в центральную часть слитка и определения глубины



его погружения в различные моменты времени.

Рис 4.9. Схема к замерам глубины усадочной раковины и интерпретации ее параметров по табл.4.9

В таблице 4.12 и на рисунке 4.10 представлены результаты сравнения промышленного и численного экспериментов. Моделирование выполнено для слитков отлитых в чугунную и стальную изложницы. Эксперимент – для слитков, отлитых в чугунную изложницу.

Таблица 4.12. Динамика глубины жидкой лунки колесного слитка в процессе затвердевания

№№ п п	Время затвердевания слитка, мин	Глубина жидкой лунки, мм		
		Эксперимент (чугунная изложница)	Расчет	
			Чугунная изложница	Стальная изложница
1	45	1600	1720	1348
2	50	500	630	465
3	60	300	400	310
4	70	200	213	236

Несмотря на приближенность результатов экспериментального (не всегда можно прутом попасть в наиболее глубокую часть лунки) и численного экспериментов (в расчете глубина лунки принята при доле твердой фазы на фронте кристаллизации равной 0,9), качественно характер кривых совпадает.

В осевой зоне, как показывают расчеты, расплав затвердевает быстрее в стальной изложнице. Однако, это в определенной степени связано с точностью теплофизических параметров материалов (см. табл. 4.7, 4.9). Тем не менее, применение стальной изложницы не имеет причин для ухудшения качества внутренней зоны колесного слитка. Учитывая высокие значения стойкости стальных изложниц, принятое на заводе решение о замене ими чугунных изложниц является прогрессивным.

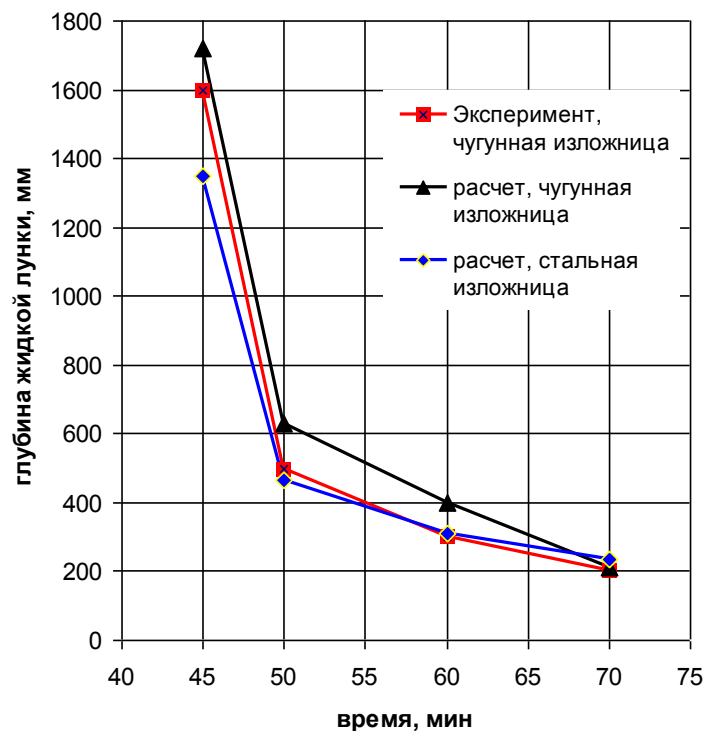


Рис.4.10. Сравнение результатов промышленного и численного экспериментов определения глубины жидкой лунки слитка, отлитого в чугунную и стальную изложницы

Время затвердевания осевой зоны слитка в чугунной изложнице по результатам моделирования составляет примерно 90 минут, и хорошо совпадает с экспериментальными исследованиями при экстраполяции кривых.

Обзор аналитических методов расчета затвердевания слитков различной конфигурации и массы приведен в работе Л. Шмрга [18]. На основании экспериментальных исследований, проведенных Б.Б.Гуляевым и В.М. Тагеевым, получена аналитическая формула времени затвердевания слитка τ , мин от его радиуса R , см.:

$$\tau = 0,112 \times R^2 ; \tag{4.1}$$

Время затвердевания слитка, рассчитанное по формуле (4.1) – 70 мин.

Температуру внешней поверхности стальной и чугунной изложницы при разливки стали и формировании слитка измеряли пирометром на расстоянии 0,2 и 1,5 м от поддона. Температура разливки стали 1550⁰С. Слиток отливали 16 минут. Указанные параметры введены в программу и просчитано изменение температуры поверхности чугунной и стальной изложницы от

начала отливки слитка до его затвердевания для проверки адекватности модели производственным условиям.

Расчетные и экспериментальные данные приведены в таблице 4.13 и на рис. 4.11, 4.12, 4.13. Продолжительность экспериментальных замеров ограничена повышением температуры в месте нахождения экспериментатора. Характер распределения температур, как для экспериментальных, так и расчетных данных качественно совпадает. Максимальная погрешность расчетов не более 6%, что подтверждает адекватность модели.

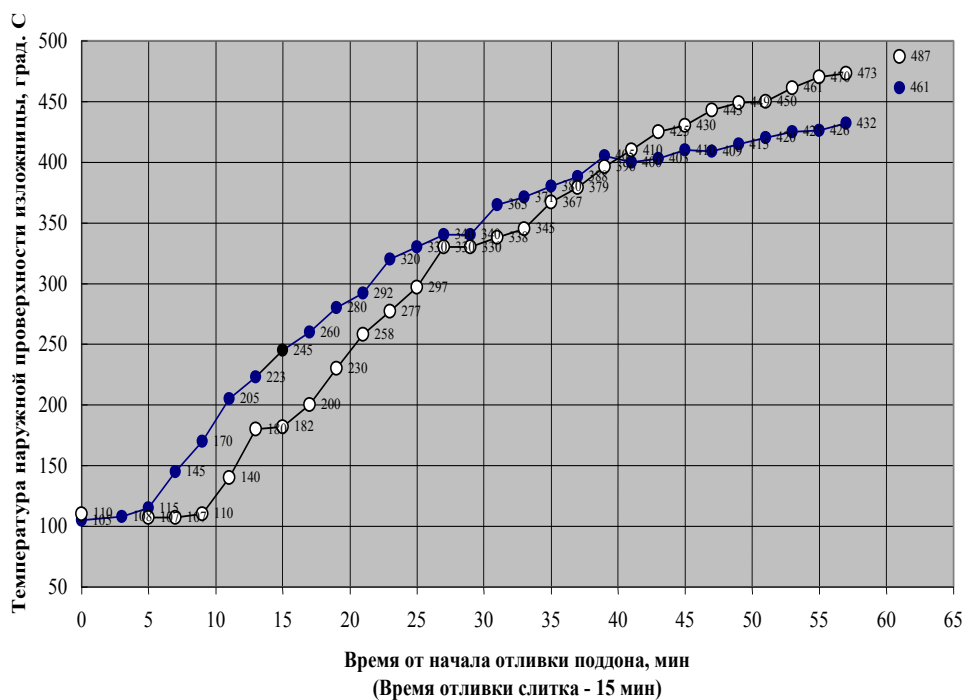


Рис. 4.11. Изменение температуры поверхности чугуна изложницы (эксперимент).

● — температура низа изложницы (200 мм от поддона); ○ — середина изложницы по высоте (1,5 м)

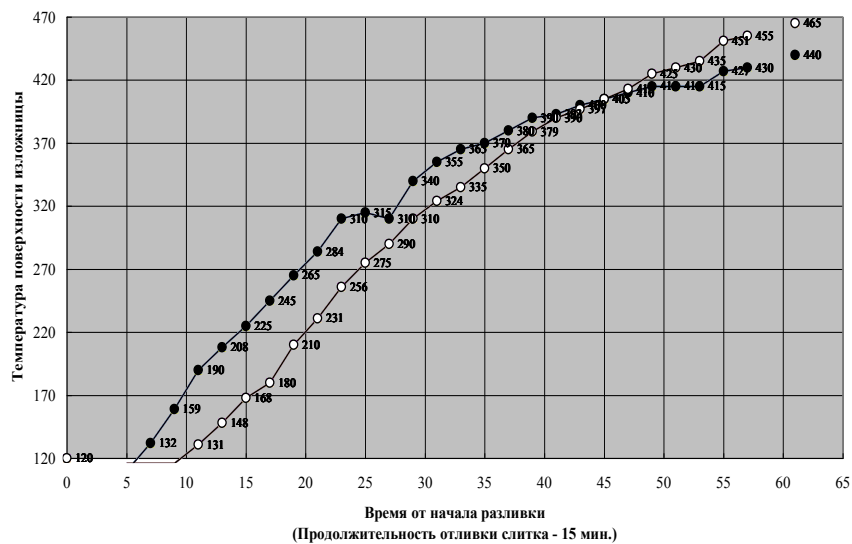


Рис. 4.12. Изменение температуры стальной изложницы (эксперимент).

- – температура низа изложницы (200 мм от поддона);
- – середина изложницы по высоте (1,5 м).

Таблица 4.13. Расчетное изменение температуры поверхности чугунных и стальных изложниц КП-8

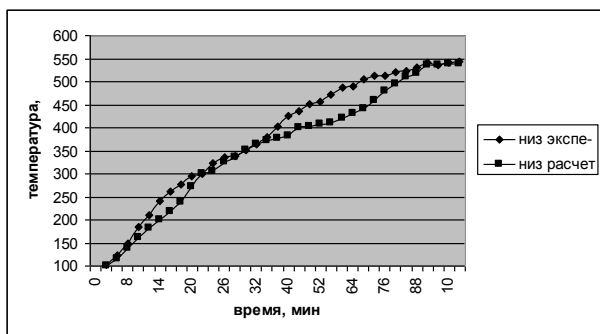
при отливке и затвердевании слитков колесной стали массой 4,2 тонны (контрольные измерения).

Температура начала разливки стали – 1555 °С.

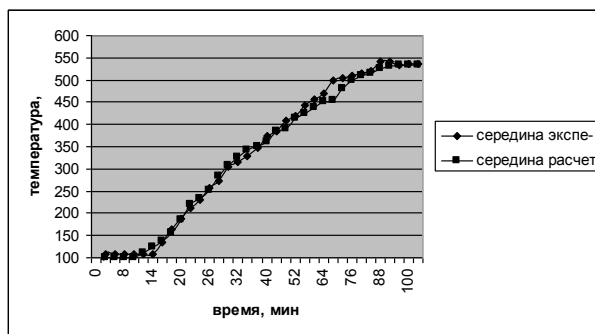
Продолжительность отливки слитка – 16 мин.

№ замера	Время от начала отливки, мин.	Температура поверхности, °С							
		Чугунная изложница				Стальная изложница			
		низ		середина		Низ		середина	
		эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет
11-02	0	97	100	107	100	104	100	129	100
1	4	123	116	107	100	110	112	129	100
2	6	150	138	107	100	125	141	129	100
3	8	185	161	107	100	155	170	129	100
4	10	210	182	107	111	179	220	129	113
5	12	240	201	107	125	205	230	129	159
6	14	261	219	135	136	226	250	137	197
7	16	278	238	165	155	241	355	157	200
8	18	295	272	187	186	255	389	182	218
9	20	301	299	212	220	268	300	190	245
10	22	324	306	230	232	283	311	205	259
11	24	335	325	257	251	290	322	235	286
12	26	339	337	274	284	299	329	249	301
13	28	351	351	305	307	320	335	260	311
14	30	363	363	315	326	339	342	295	329
15	32	380	371	330	341	354	345	304	337
16	34	402	376	347	350	365	349	325	344
17	36	425	381	375	361	373	352	343	356
18	40	435	400	385	384	399	353	348	361
19	44	451	402	408	391	417	394	360	368
20	48	457	407	420	415	421	405	370	373
21	52	473	410	443	425	430	455	383	378
22	56	486	420	456	438	436	455	402	392
23	60	490	430	470	450	453	455	415	417
24	64	505	440	498	454	460	457	427	428
25	68	512	460	504	479	472	466	440	459
26	72	512	480	510	500	478	473	462	469
27	76	521	495	515	510	488	484	470	479
28	80	523	509	519	515	490	493	460	499
29	84	531	519	541	525	499	501	466	499
30	88	542	535	542	530	503	501	471	499
31	92	537	536	533	534	503	502	479	500
32	96	540	538	537	534	504	502	482	501
33	100	543		537		509	502	500	501

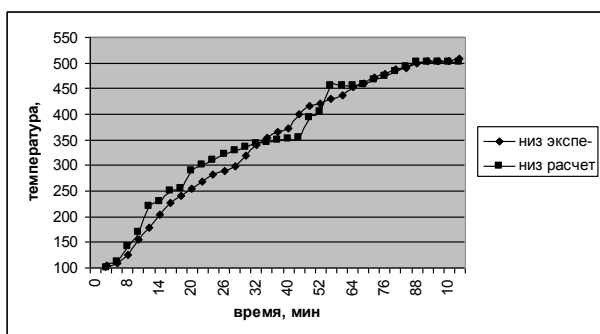
Полученные результаты подтверждают, что математическая модель качественно и количественно отражает температурные условия формирования слитка колесной стали, отливаемого в 8-ми заготовочные чугунные и стальные изложницы КП-8.



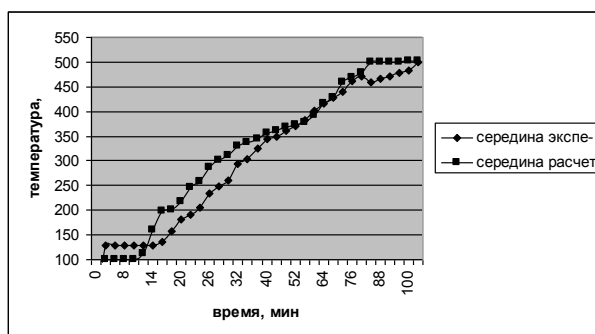
a



б



в



г

Рис.4.13. Результаты экспериментального и численного определения динамики температуры поверхности чугунной (*a* – 200 мм от дна изложницы, *б* – середина изложницы) и стальной изложницы (*в* – 200 мм от дна изложницы, *г* – середина изложницы).

4.10. Гидродинамические и теплофизические процессы при разливке и формировании слитка

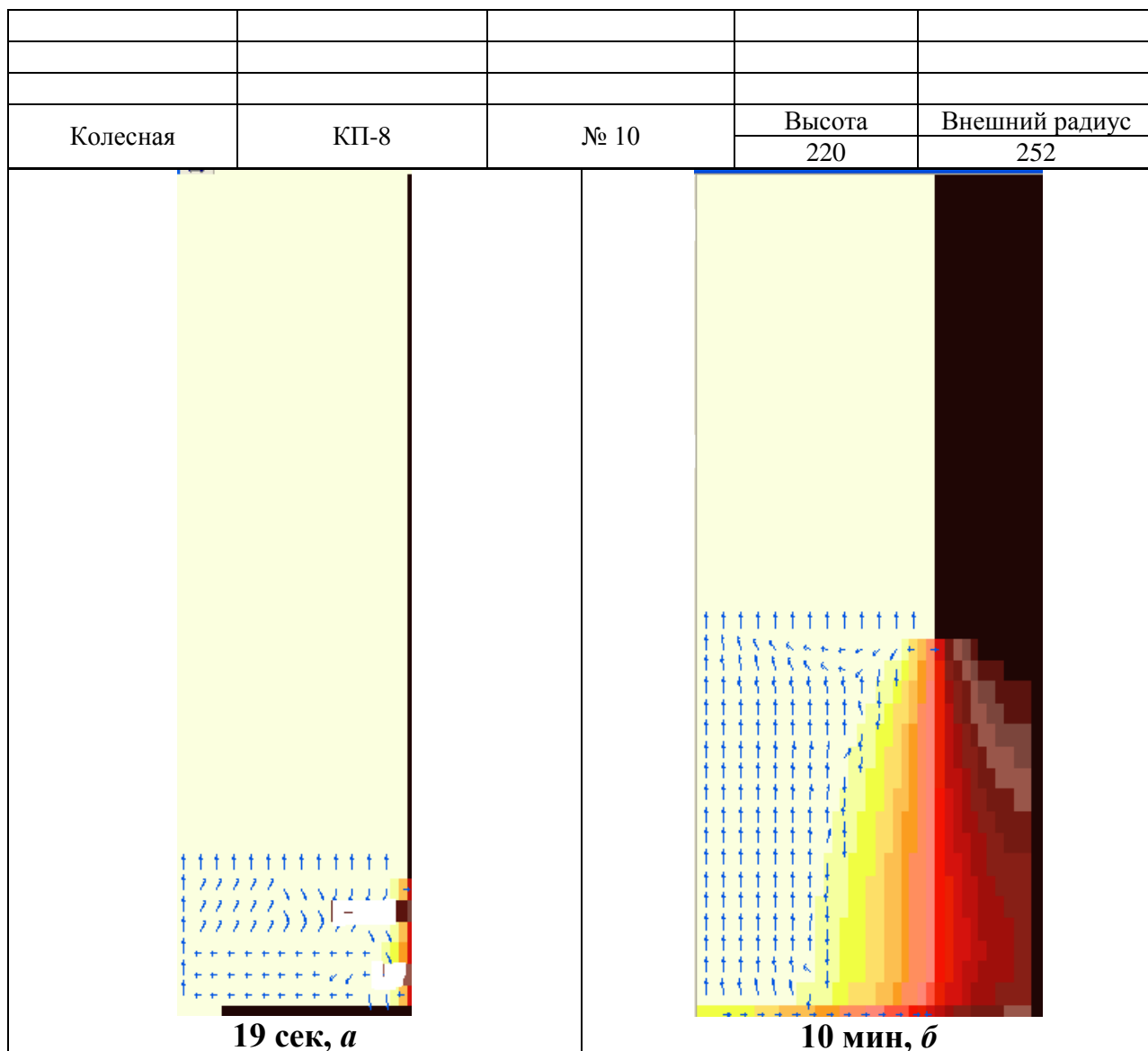
При общей продолжительности отливки слитка 16 – 18 мин (до проведения настоящей работы) и длительности наполнения теплоизолирующей вставки высотой 220 мм в течение примерно 2 мин линейная скорость наполнения тела слитка находится в пределах 180 – 210 мм/мин соответственно.

В модели донная часть изложниц на высоту 80 – 100 мм наполняется в течение 25 – 30 сек с линейной скоростью 160 – 220 мм/мин. В численном эксперименте приняты следующие параметры:

Высота изложницы 3130 + 15 мм. Внешний диаметр изложницы в нижней части 850₋₂ мм, внутренний диаметр изложницы в нижней части 500⁺² мм; внешний диаметр изложницы в верхней части 850₋₂ мм, внутренний диаметр в верхней части 506±2 мм. Материал изложницы чугун СЧ 15-32 ГОСТ 1412-70. Изложницы цилиндрические. Конусность на изложнице отсутствует. Размеры утепляющей вставки приведены в табл. 4.14.

Таблица 4.14. Размеры утепляющей вставки

Изложница	Тип изложницы	Номер изделия	Размер вставки, мм
-----------	---------------	---------------	--------------------



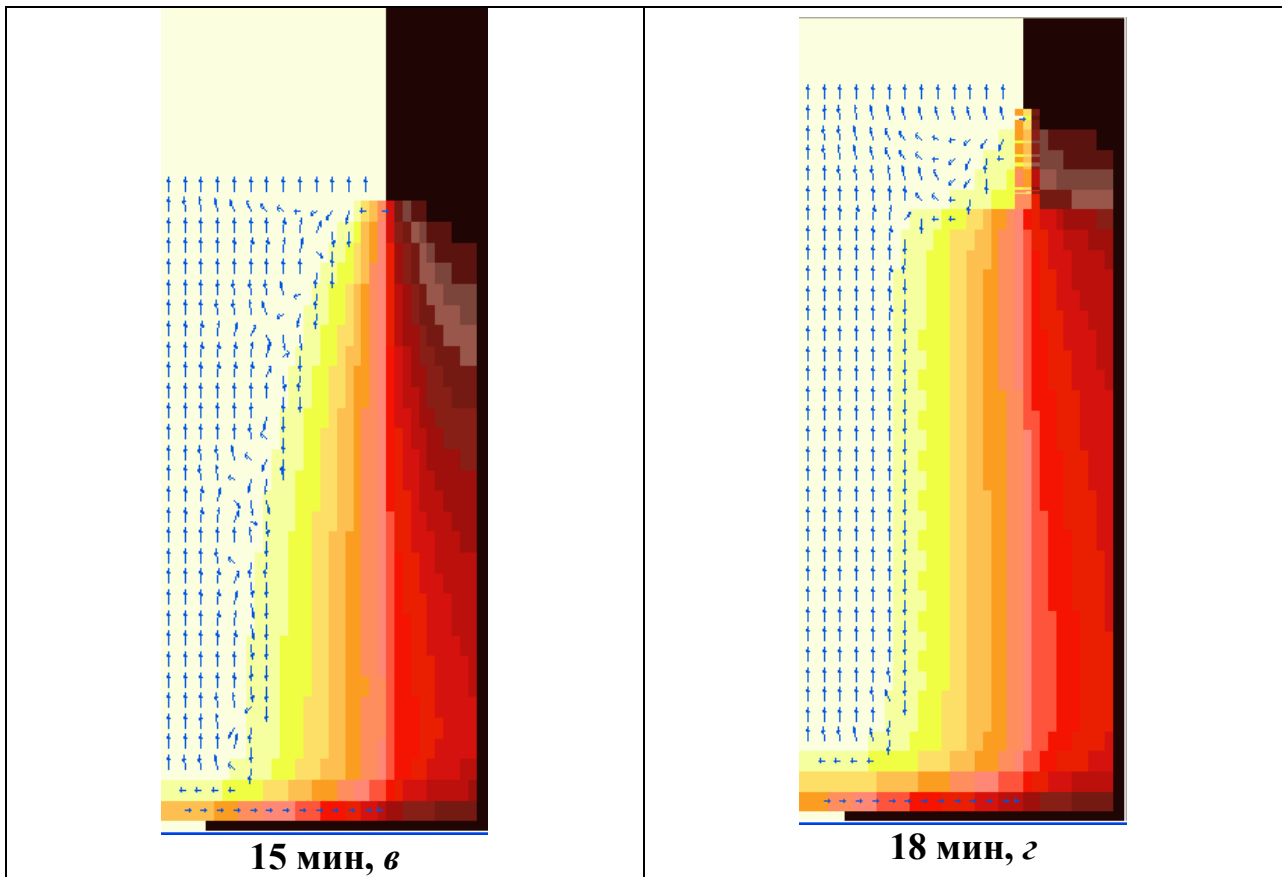


Рис. 4.14. Вектора вертикальной компоненты скорости и кинетика затвердевания слитка в различные моменты времени его наполнения (19 сек – *a*, 10 мин. – *б*, 15 мин – *в*, 18 мин – *г*)

На рис. 4.14 представлены вектора вертикальной компоненты скорости в расплаве в различные моменты наполнения изложницы (19 сек – *a*, 10 мин. – *б*, 15 мин – *в*, 18 мин – *г*).

Как видно, уже через 10 мин наблюдается не только струйное течение, индуцируемое струей, но и естественное конвективное, вследствие градиента температур. Со временем этот вклад естественной конвекции возрастает, что подтверждают эпюры скоростей (рис.4.15) Немонотонное изменение кривой, характеризующей вертикальную компоненту скорости на 10, 15 минутах, свидетельствует о наличие вихря в пристеночной области.

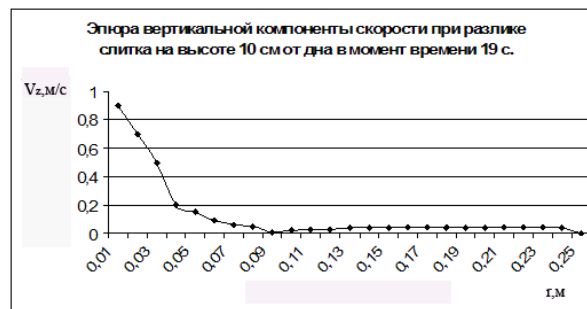




Рис.4.15. Эпюры вертикальной компоненты скорости по радиусу изложницы при разливке слитка в различные моменты времени

С окончанием разливки (рис. 4.16, з), остаточное влияние струи практически не сказывается на гидродинамической картине в расплаве. Однако наблюдаются две зоны, характеризующиеся различной тепловой обстановкой как в теле слитка, так и в области теплоизолирующего вкладыша. Если в теле слитка движение металла осуществляется по законам конвективного движения: в центре восходящие потоки, а на фронте кристаллизации нисходящие, то горячий расплав из центральной части выносится в головную и, опускаясь вдоль границы фронта кристаллизации, остывает, формируя утолщенную твердую корочку в нижней части слитка, тогда как в головной части, подпитываемой горячими порциями расплава и хорошо теплоизолированной, затвердевание начинается в последнюю очередь (рис. 4.16).

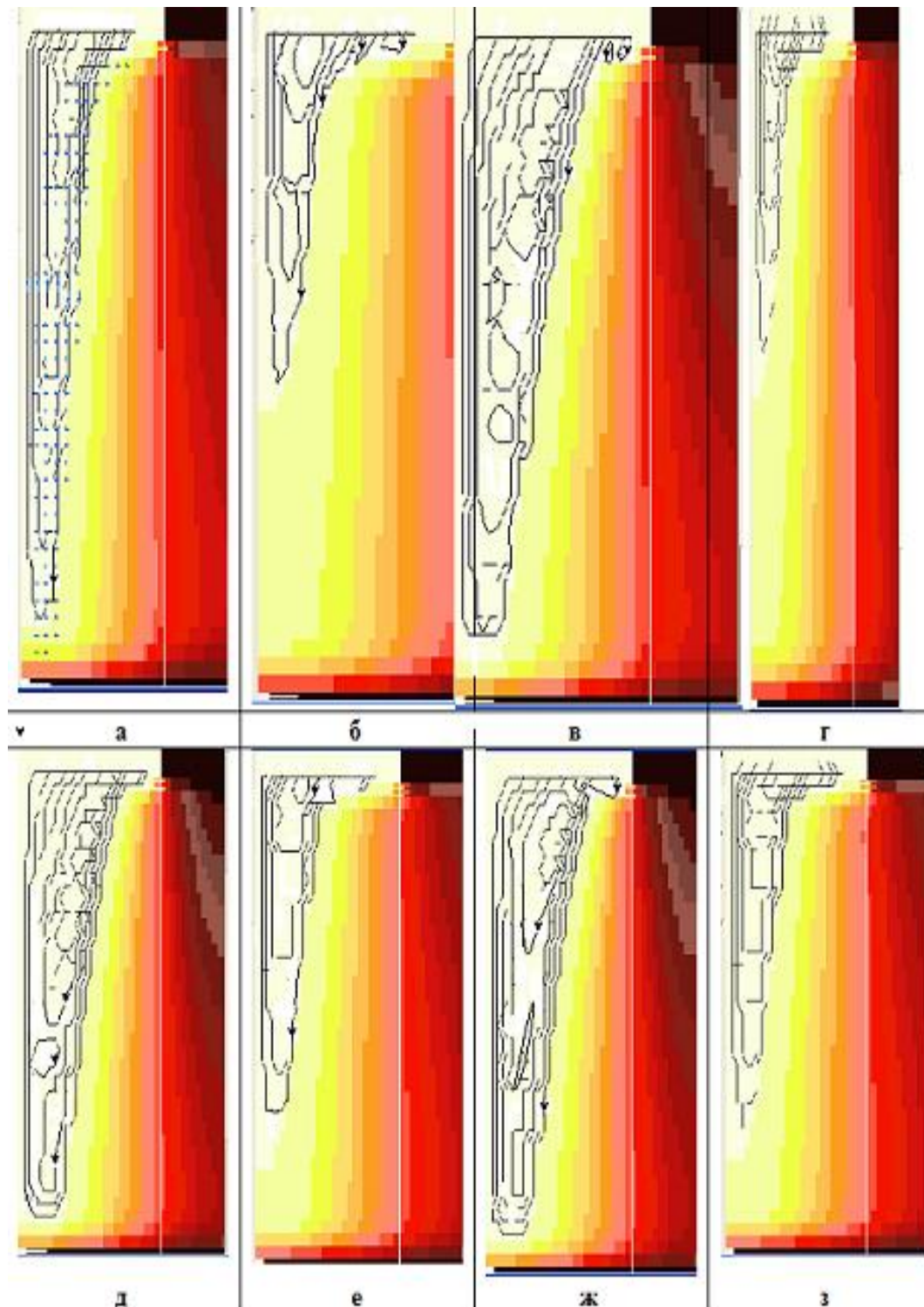


Рис.4.16. Линии тока и изотермы слитка в стальной (*а – г*) и чугунной изложнице (*д – з*) в моменты времени: 12 мин (*а, в, д, ж*); 20 мин (*б, г, е, з*) после начала разливки; вкладыш 220 мм (*а – е*), 270 мм (*ж, з*); время наполнения изложницы 10 мин. (*а, б*); 12 мин. (*в – з*)

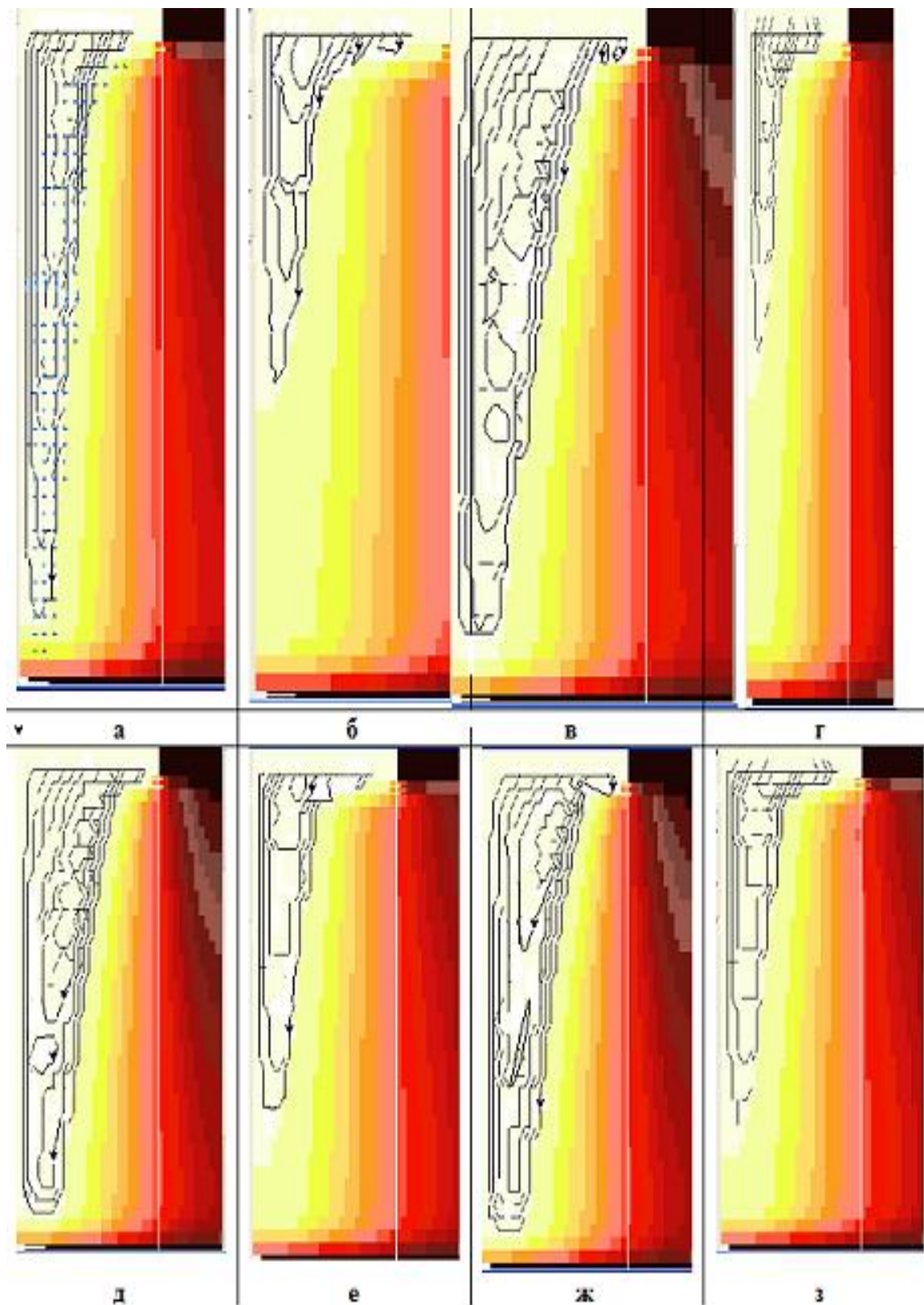


Рис.4.17. Линии тока и изотермы слитка в стальной (а – г) и чугунной изложнице (д – з) в моменты времени: 12 мин (а, в, д, ж); 20 мин (б, г, е, з) после начала разливки; вкладыш 220 мм (а – е), 270 мм (ж, з); время наполнения изложницы 10 мин. (а, б); 12 мин. (в – з)

Влияние скорости разливки и высоты теплоизолирующей вставки на глубину усадочной раковины

Выполнено математическое моделирование влияния рассматриваемых факторов на глубину усадочной раковины при исходном перегреве стали над температурой ликвидус 74°C (середина регламентируемого диапазона перегревов для стали марки КП2). Результаты приведены в таблице 4.15 и на рис. 4.18, 4.19.

Математическое моделирование выявило интересные и несколько неожиданные результаты:

1. Во всех случаях, за исключением высоты вкладыша 190 мм, глубина усадочной раковины меньше высоты теплоизолирующей вставки.

2. Глубина усадочной раковины при отливке слитков в чугунную изложницу несколько больше (на 5 – 10 мм), чем при отливке слитков в стальную изложницу.

Это связано с различием теплофизических свойств стальной и чугунной изложниц и свидетельствует о высоких теплоизолирующих свойствах вставок производства Северского завода и весьма высокой эффективности использования физического тепла относительно небольшого объема металла (7 – 9 %). Этому способствует также правильно подобранный состав, свойства и расход теплоизолирующих смесей для разливки стали, а также покровных смесей для изоляции зеркала металла в ковше после вакуумирования.

По-видимому, по этой причине не было обнаружено изменения величины отбраковки головных заготовок по дефекту «усадочная раковина» при уменьшении высоты вставки с начальных 270 до 220 мм.

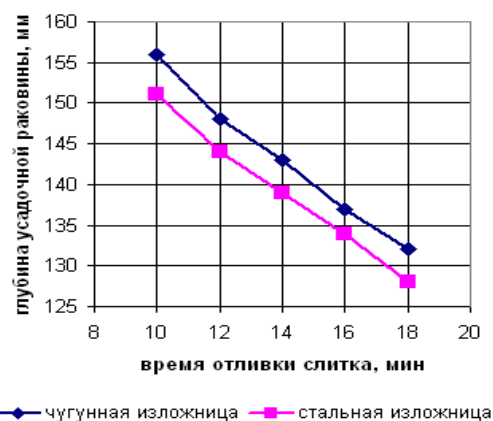
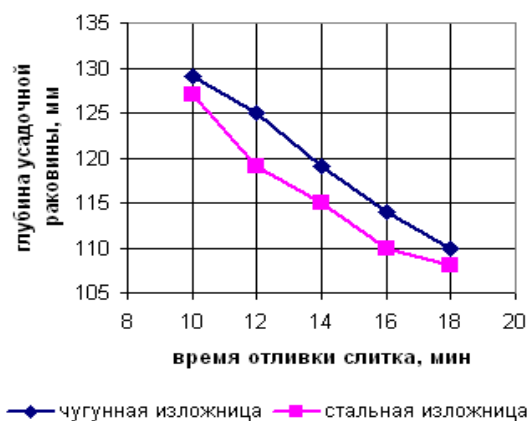
4. При решении вопроса устранения потеков металла по телу слитка и улучшения условий работы резцов первого реза целесообразно опробование уменьшения высоты стальных изложниц и соответственно слитка на 50 мм.

Это позволит снизить расходный коэффициент металла на колеса сортамента 957 мм не менее, чем на 1,5%.

Таблица 4.15. Результаты математического моделирования изменения глубины усадочной раковины от скорости разливки стали и высоты теплоизолирующей вставки

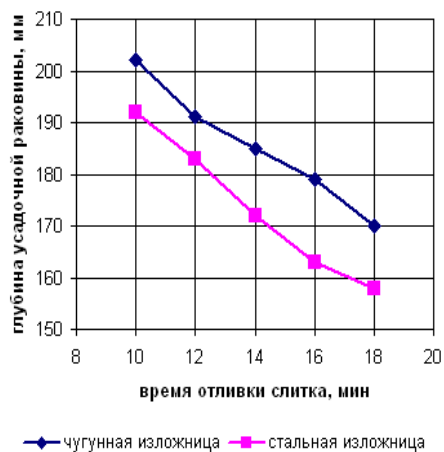
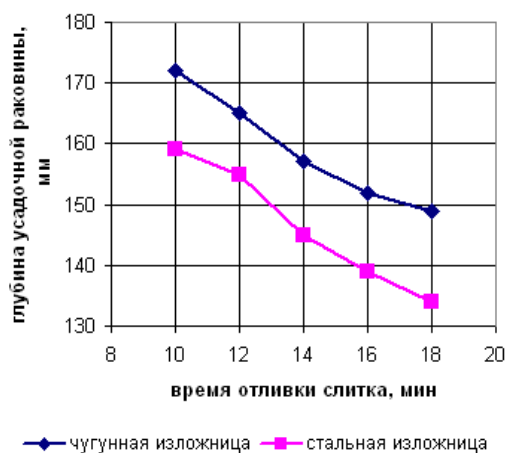
№ № пп	Высота теплоизолирующего вкладыша, мм	Время отливки слитка, мин	Глубина усадочной раковины в слитке, мм		№ № пп	Высота теплоизолирующего вкладыша, мм	Время отливки слитка, Мин	Глубина усадочной раковины в слитке, мм	
			Отливом в чугунную изложницу	Отливом в стальную изложницу				Отливом в чугунную изложницу	Отливом в стальную изложницу
1	250	18	110	108	11	200	18	149	134
2		16	114	110	12		16	152	139
3		14	119	115	13		14	157	145

4		12	125	119	14		12	165	155
5		10	129	127	15		10	172	159
6	220	18	132	128	16	190	18	170	158
7		16	137	134	17		16	179	163
8		14	143	139	18		14	185	172
9		12	148	144	19		12	191	183
10		10	156	151	20		10	202	192



a

б



в

г

Рис. 4.18. Изменение глубины усадочной раковины от скорости отливки слитка (расчет).
Высота вкладыша: *a* – 250 мм, *б* – 220 мм, *в* – 200 мм, *г* – 190 мм

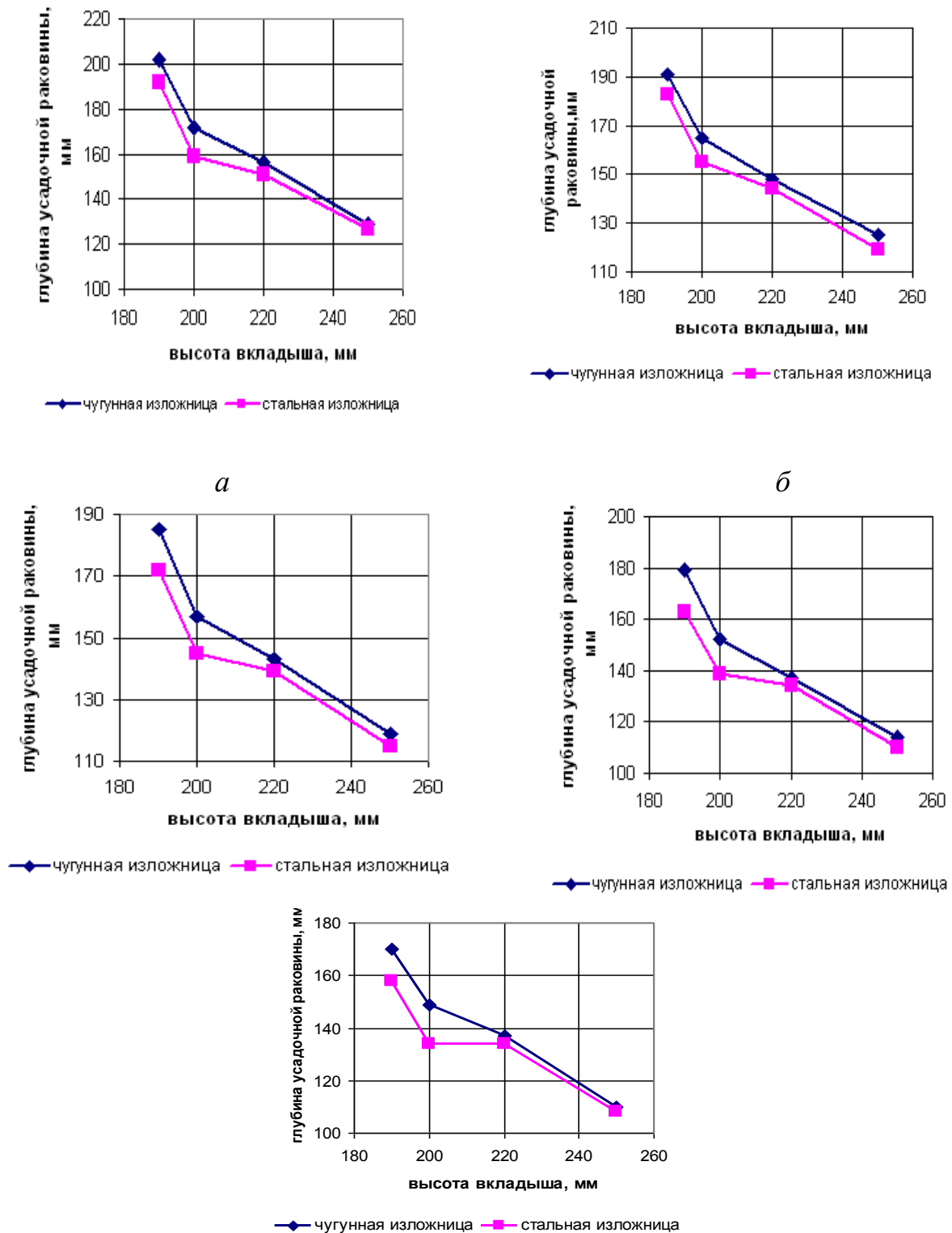


Рис. 4.19. Изменение глубины усадочной раковины от высоты вкладыша (расчет): Общее время отливки слитка: *а* – 10 мин, *б* – 12 мин, *в* – 14 мин, *г* – 16 мин, *д* – 18 мин

В использованной методике расчет усадочной раковины осуществляется от уровня налива слитка (зеркала металла в конце наполнения изложницы). Возвращаясь к схеме рис. 4.3,а, обращаем внимание на то, что за уровень налива принята верхняя кромка теплоизолирующей вставки, устанавли-

ваемой заподлицо с верхним торцом изложницы. Фактический уровень налива металла примерно на 50 мм ниже за счет слоя теплоизолирующей смеси на поверхности слитка в изложнице в конце отливки слитка. За счет этого следовало бы опустить нижнюю расчетную границу усадочной раковины (глубину усадочной раковины) на 50 мм по сравнению с расчетной величиной, определенной от верхнего торца изложницы.

Следует учесть также эмпирически то обстоятельство, что в процессе образования усадочной раковины происходит опускание поверхности жидкого металла в прибыльной части слитка примерно на 50 мм и образование «короны» слитка примерно на этой высоте, а также вертикальная усадка всего слитка также примерно на 50 мм. В связи с этим, измеряемые на практике фактические величины глубины усадочной раковины не могут быть достаточно точно соотнесены с расчетными величинами. Последние могут быть сравниваемы только между собой для оценки влияния, например, высоты теплоизолирующей вставки на глубину распространения в ней усадочной раковины. Такие расчеты были выполнены для четырех вариантов высоты теплоизолирующей вставки: $h = 0,25; 0,22; 0,20$ и $0,19$ м.

Первоначально в восьмизаготовочных изложницах цех работал со вставкой 270 мм. Однако при этом в колесопрокатном цехе столкнулись с тем обстоятельством, что вследствие образования под заплечиками теплоизолирующей вставки пояска, запороченного теплоизолирующей смесью, в довольно большом количестве случаев не хватало высоты тела слитка для его раскроя на восемь заготовок, так как образование такого пояска при определении расчетной высоты (длины) слитка не учитывалось. Было принято решение совместно с КПЦ об увеличении рабочей высоты тела слитка на 20 мм за счет уменьшения высоты теплоизолирующей вставки.

Это дало положительные результаты, однако, не решило проблемы «непрорезов» между прибыльной частью слитка и головной заготовкой. Из зоны реза удалось удалить собственно шлаковый поясок. Однако тело слитка в зоне первого реза продолжало поражаться потеками металла, образующимися вследствие прорывов шлакового пояса жидким металлом из прибыльной части в процессе усадки слитка и затеканием его в зазор, образующийся между телом слитка и изложницей.

Было принято решение еще уменьшить высоту теплоизолирующей вставки до 220 мм с тем, чтобы при утвержденной схеме порезки первый рез не попадал на запороченную часть тела слитка. Рабочей гипотезой было «замораживание» потеков на теле слитка на расстоянии до первого реза.

Проверочными расчетами контролировалась расчетная глубина усадочной раковины из условия, чтобы эта величина, во избежание ухудшения макроструктуры осевой части слитка, не выходила за пределы высоты теплоизолирующей вставки.

Влияние скорости разливки на глубину усадочной раковины при прочих равных условиях качественно тривиально. Чем больше скорость разлива-

ки, тем больше глубина усадочной раковины. Однако количественно оценить влияние этого фактора в чистом виде возможно лишь с помощью математического моделирования.

Для оценки этого влияния выбрана отливка из стали марки КП-2 в чугунные и стальные изложницы с теплоизолирующей вставкой высотой 250, 220, 200, 190 мм.

Результаты численного эксперимента приведены в табл. 4.15 и в графической интерпретации на рис. 4.18.

При различной длительности разливки стали усадочная раковина в слитках, отливаемых в стальную изложницу, меньше, чем в чугунную. Минимальные значения усадочная раковина имеет при разливки стали в течение 18 мин, максимальные – 10 мин. При выводе из эксплуатации чугунных изложниц и замене их стальными возможно сокращение времени отливки слитков вплоть до 10 мин без ущерба для макроструктуры осевой зоны слитка для снижения загруженности разливочного пролета и задолженности разливочных кранов непосредственно на операции разливки.

При выводе из эксплуатации чугунных изложниц и замене их стальными возможно сокращение времени отливки слитков вплоть до 10 мин. Без ущерба для макроструктуры осевой зоны слитка для снижения загруженности разливочного пролета и задолженности разливочных кранов непосредственно на операции разливки.

4.11. Влияние величины перегрева стали на глубину усадочной раковины

Технологическими инструкциями по разливке колесных марок стали предусмотрен диапазон температуры 10°C . Выполнено математическое моделирование изменения величины перегрева над температурой ликвидус для колесной стали марки КП-2 в ряде 69, 74, и 79°C .

Однозначного ответа о влиянии перегрева на глубину распространение усадочной раковины нет. С одной стороны, более теплый металл имеет меньшую плотность и при застывании должен давать большую усадку. С другой стороны, более холодный металл имеет в начале кристаллизации большую плотность. И казалось бы, с этой позиции должен давать меньшую усадку. Однако вопрос этот на практике решается не так однозначно. При разливке металла в слитки с прибыльными надставками (вставками) одновременно с протеканием процессов теплоотвода протекают массообменные процессы, одним из основных моментов которых является гидродинамика жидкого металла. При снижении начальной температуры металла гидродинамические процессы протекают менее интенсивно вследствие быстрой потери металлом жидкоподвижности.

Из практики известно, что при разливке «холодного» металла слитки поражаются глубокими усадочными раковинами. При производстве проката это приводит к значительной отбраковке по дефектам усадочного происхождения.

Математическая модель кристаллизации слитка учитывает как теплофизическую, так и гидродинамическую сторону процесса, и с наименьшими материальными временными затратами способна дать надлежащий ответ.

Результаты численного эксперимента влияния перегрева над температурой ликвидус для стали марки КП2 показывают, как для случая отливки слитка в чугунную, так и в стальную изложницы с увеличением перегрева от 69 до 79 град. глубина усадочной раковины несколько увеличивается (рис. 4.20).

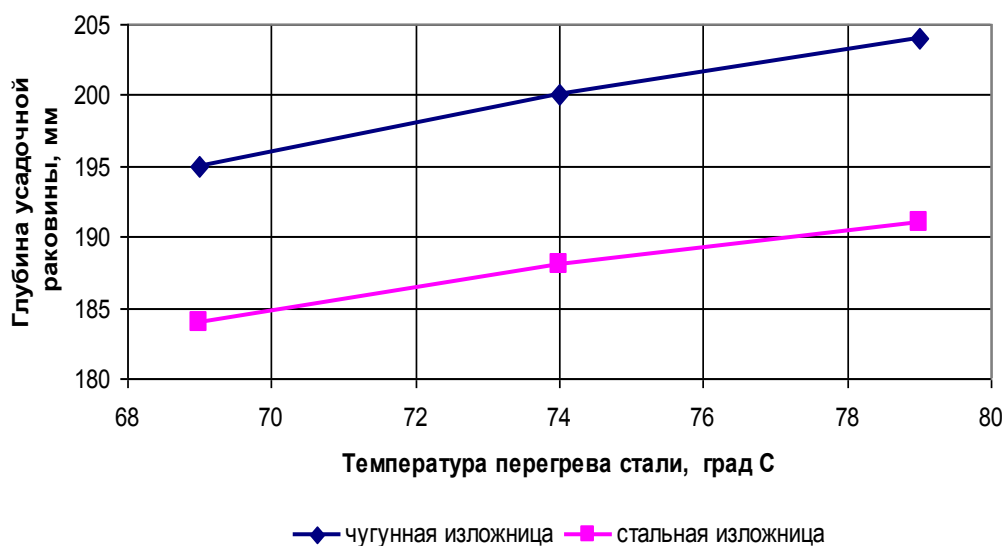


Рис. 4.20. Глубина усадочной раковины в зависимости от начального перегрева стали (численный эксперимент)

Это увеличение для случая чугунной изложницы составляет менее 10 мм (менее 5% или $\pm 2,5\%$ от среднего значения), а для случая стальной изложницы – менее 8 мм (менее 4.4% или $\pm 2,2\%$ от среднего значения). При том, что глубина усадочной раковины находится в пределах объема теплоизолирующей вставки (прибыльной части слитка) это влияние следует признать несущественным. Регламентируемый технологической инструкцией диапазон обеспечивает при его соблюдении требуемое качество слитка.

На основании результатов работы предложены изменения в технологию производства колесных слитков из стали марок КП2, КПТ и других. Совместно с мартеновским цехом, КПЦ и ЦЗЛ произведено в два этапа изменение высоты утеплительных вставок с 270 до 220 мм. Изделия с указанными размерами производятся Северским заводом и внедрены в производство, получен акт внедрения.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Емельянов А.П. Технология литейной формы / А.П.Емельянов. – М.: Машиностроение, 1978. – 239с.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А.Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552с.
3. Огурцов А.П. Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания / А.П.Огурцов, Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов. – Днепродзержинск: ДГТУ, 1994. –180с.
4. Недопекин Ф.В. Влияние газового зазора на процессы, происходящие в затвердевающем расплаве / Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов // Известия ВУЗов. Черная металлургия, 1986, N 7, С.157-158.
5. Огурцов А.П. Математическое моделирование процессов переноса в слитках и отливках с учетом внешних воздействий / А.П.Огурцов, Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов. – Днепродзержинский гос. техн.ун-т,1997. – 199 с.
6. Повх И.Л. Техническая гидродинамика / И.Л.Повх. – Л. "Машиностроение", 1972. – 452 с.
7. Недопекин Ф.В. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование / Ф.В.Недопекин, В.В.Белоусов, В.М.Кондратенко и др. – Донецк: ООО «Юго-восток», ЛТД, 2005. – 231с.
8. Самарский А.А. Введение в конечные разности / А.А.Самарский. – М.: Наука,1979. – 650 с.
9. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамических теплофизических процессов в системе затвердевающий расплав – изложница – утепляющий вкладыш / Ф.В.Недопекин, С.С.Петренко. – ТВТ, 1985. – Т.23, №3. – С. 549-555.
10. Недопекин Ф.В. Конечно-разностное решение сопряженной задачи теплопереноса, естественной конвекции и затвердевания / Ф.В.Недопекин, С.С.Петренко. – ИФЖ, 1984. – Т.97, №2. – С. 286-293.
11. Недопекин Ф.В. Влияние естественной конвекции на затвердевание уширенных книзу слитков спокойной стали / Ф.В.Недопекин, С.С.Петренко, В.Ф.Поляков. – Изв. АН СССР. Металлы, 1985. – №2. – С. 64-69.
12. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование затвердевания и формирования усадочных раковин в системе слиток – изложница – вкладыш / Ф.В.Недопекин, С.С.Петренко, В.Ф.Поляков. – Разливка стали в слитках: Сб. науч. тр. / ИПЛ АН УССР. – Киев: Техніка, 1987. – С. 36-37.
13. Недопекин Ф.В. Развитие конвективных течений в затвердевающем слитке / Ф.В.Недопекин, С.С.Петренко, В.Ф.Поляков и др. – Изв. вузов. Черная металлургия, 1984. – №9. – С. 45-48.
14. Elder J.w. Turbulent free convection in a vertical slot / Elder J.w. – J. Fluid Mech.-Vol.23.-1965, NO 1., P. 77 – 98.

15. Дайковский А.Г. Исследование структуры переходного и турбулентного режимов конвекции в вертикальном слое / А.Г.Дайковский, В.М.Полежаев, А.И.Федосеев. – Изв. АН СССР. МЖГ, 1978. –№6. – С. 87-96.
16. Казанцев Е.И. Промышленные печи : справочное руководство для расчетов и проектирования : учебное пособие для металлургических спец.вузов. / Е.И.Казанцев – М.: Металлургия, 1975. – 363 с.
17. Масленков С.Б., Стали и сплавы для высоких температур / С.Б.Масленков, Е.А.Масленкова. – М.: Металлургия 1991. – 832 с.
18. Шмрга Л. Затвердевания и кристаллизация стальных слитков / Л.Шмрга. – М.: Металлургия, 1985. – 248с.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОПЕРЕНОСА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ СЛИТКОВ

Развитие современной техники предъявляет высокие требования к качеству и свойствам литых изделий, вызывает необходимость создания высоких технологий разливки и кристаллизации стальных сплавов. Одним из основных направлений решения поставленных задач является получение изделий, которые состоят из нескольких слоев сталей с различными теплофизическими свойствами, т.е. композитных слитков – многослойных и армированных с внутренним холодильником. Вместе с тем, до сих пор недостаточно изучен вопрос количественной взаимосвязи гидродинамических и теплофизических параметров формирования композитных стальных слитков и влияние их на структуру и физико-механические характеристики литого металла.

В данной главе исследовались: основные закономерности развития теплофизических и гидродинамических процессов, в том числе определение поля температуры, скорости расплава, твердой фазы при различных режимах формирования композитного слитка; определение адекватности математической модели формирования композитных слитков; расчет макроструктуры стали многослойного и армированного слитков; исследование процесса затвердевания армированного слитка, а также нагревание и плавление внутреннего холодильника.

5.1. Постановка задачи

Решение задачи осуществлялось в двумерной постановке для стального квадратного слитка, уширенного кверху [1-3]. В виду симметрии исследуемой системы слиток – изложница область исследования выбиралась как половина продольного сечения композитного слитка.

Моделировался процесс разливки 11-тонного композитного слитка уширенного кверху с прибыльной надставкой. Формирование многослойного слитка (МС) осуществлялось в три этапа.

При заполнении изложницы легированной сталью происходит затвердевание стали при идеальном тепловом контакте слитка с изложницей. Теплообмен излучением между расплавом и изложницей не учитывается. При формировании армированного слитка происходит разливка расплава сверху. Не учитывается удар падающей струи о дно изложницы и образование заплесков металла на ее стенки и поэтому предполагается, что изложница заполняется на 20% своего объема.

В армированном слитке внутренний холодильник (ВХ) находится на оси симметрии и располагается в изложнице. Внутренний холодильник (в форме стрежня) имеет круглую или квадратную форму, и его внешняя поверхность предполагается гладкой и свободной от окалины. Весь объем ВХ имеет одинаковую начальную температуру и химический состав – такие же, как и поступающий расплав.

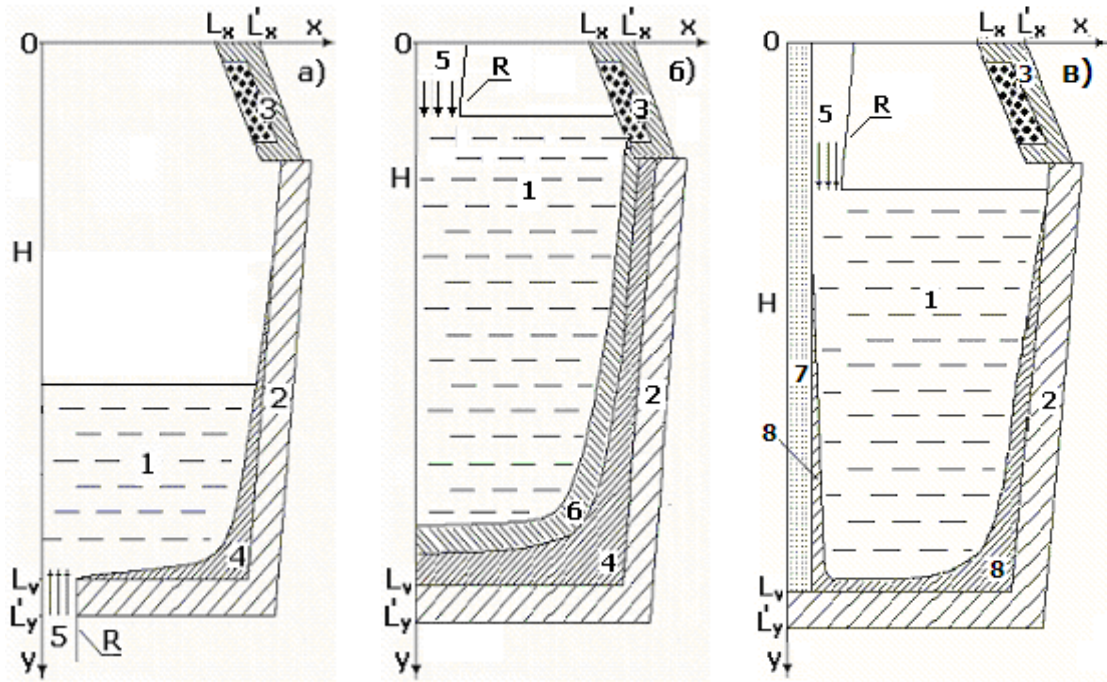


Рис. 5.1. Схема исследуемой области:

- а) многослойный слиток – сифонная разливка;
- б) многослойный слиток – разливка сверху;
- в) армированный слиток;
- 1 – расплав; 2 – изложница; 3 – прибыльная надставка;
- 4 – твердая фаза МС;
- 5 – струя расплава; 6 – корочка легированной стали при формировании второго слоя МС;
- 7 – внутренний холодильник при формировании армированного слитка;
- 8 – затвердевающая корочка на стенке изложницы.

В основу математической модели формирования многослойного и армированного слитков взяты нестационарные безразмерные уравнения переноса вихря скорости, переноса газовой фазы и теплопереноса в расплаве. Также в модели учитываются тепловые процессы, связанные с образованием доли твердой фазы, которая определяет кинетику кристаллизации в приближении неравновесной двухфазной зоны [1-3]:

уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \omega}{\partial Fo} + V_x \frac{\partial \omega}{\partial X} + V_y \frac{\partial \omega}{\partial Y} = \frac{\partial}{\partial X} \left(Pr_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(Pr_{ef} \frac{\partial \omega}{\partial Y} \right) + Pr_{ef}^2 Gr \frac{\partial \theta}{\partial X} + \frac{1}{Fr} \frac{\partial \beta_g}{\partial X}; \quad (5.1)$$

уравнение вихря скорости ω

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} (1 - \xi) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} (1 - \xi) = -\omega; \quad (5.2)$$

уравнение газосодержания β_r в расплаве

$$\frac{\partial \beta_g}{\partial F_0} + V_x \frac{\partial \beta_g}{\partial X} + V_y \frac{\partial \beta_g}{\partial Y} = 0; \quad (5.3)$$

уравнение теплопереноса (θ – безразмерная температура)

$$c_{ef} \left(\frac{\partial \theta}{\partial F_0} + V_x \frac{\partial \theta}{\partial X} + V_y \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right) = \frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda_{ef} \frac{\partial \theta}{\partial Y} \right); \quad (5.4)$$

уравнение для доли твердой фазы ξ (θ_S , θ_L – солидус и ликвидус)

$$\xi = 1 - \left(1 + \frac{c_L}{L} T_0 (\theta_L - \theta_S) \right) \left[1 - \left(\frac{\theta_L - \theta}{\theta_L - \theta_S} \right)^{2/3} \right] + \frac{c_L}{L} T_0 (\theta - \theta_S). \quad (5.5)$$

Эффективные коэффициенты, входящие в уравнения, отражают многофазность среды [1,2]. При рассмотрении турбулентных режимов движения коэффициент переноса импульса определяется, как эффективный, при этом избрана однопараметрическая модель Прандтля.

Система дифференциальных уравнений (1-5) замыкается краевыми условиями. В начальный момент задаются постоянные значения температуры расплава и стенок изложницы, значение скорости и твердой фазы считаются нулевыми во всех точках расплава стали.

Граничные условия для системы слиток – изложница – окружающая среда задаются следующим образом. Для скорости движения расплава: непроницаемости и прилипания на твердых поверхностях, на оси слитка – условие симметрии. Для температуры: отсутствие потока тепла на оси слитка; на границах расплав – твердая фаза и расплав – внутренний холодильник, твердая фаза – изложница и твердая фаза – внутренний холодильник предполагается идеальный тепловой контакт. На внешних границах контакта изложницы с окружающей средой используется теплообмен по закону Ньютона-Рихмана.

5.2. Адекватность результатов численного моделирования компазитных слитков

Проведено сопоставление результатов численного моделирования (математическая модель во второй главе) с результатами физического моделирования (рис. 5.2), проведенные другими исследователями [4,5]. Где моделирующим веществом служил расплав тиосульфата натрия, который прозрачен в расплавленном состоянии.

Вычислительный эксперимент показал, что гидродинамические процессы при формировании многослойного слитка после долива расплава до уровня прибыльной части имеют некоторые особенности. Долив расплава второго металла в изложницу (рис. 5.2,а) сопровождается формированием вертикального потока, который расширяется в нижней части, где скорость потока приближается к нулю. В дальнейшем после заливки до прибыльной части происходит образование большого вихря (рис. 5.2,б), который изменяет направление на противоположное, т. к. вызван естественной тепловой

конвекцией. Затем этот вихрь разбивается на несколько вихрей (рис. 5.2,в), и здесь проявляется воздействие отвода теплоты от стенок изложницы и формирование твердой фазы на фронте затвердевания.

Авторы физического эксперимента [4,5] отмечают, что для получения однородного состава и стабильных свойств металла внутреннего слоя необходимо обеспечить активное перемешивание исходного и доливаемого расплавов. Поэтому в проводимом эксперименте после долива особое внимание обращали на глубину проникновения вводимой струи, степень и интенсивность перемешивания расплавов.

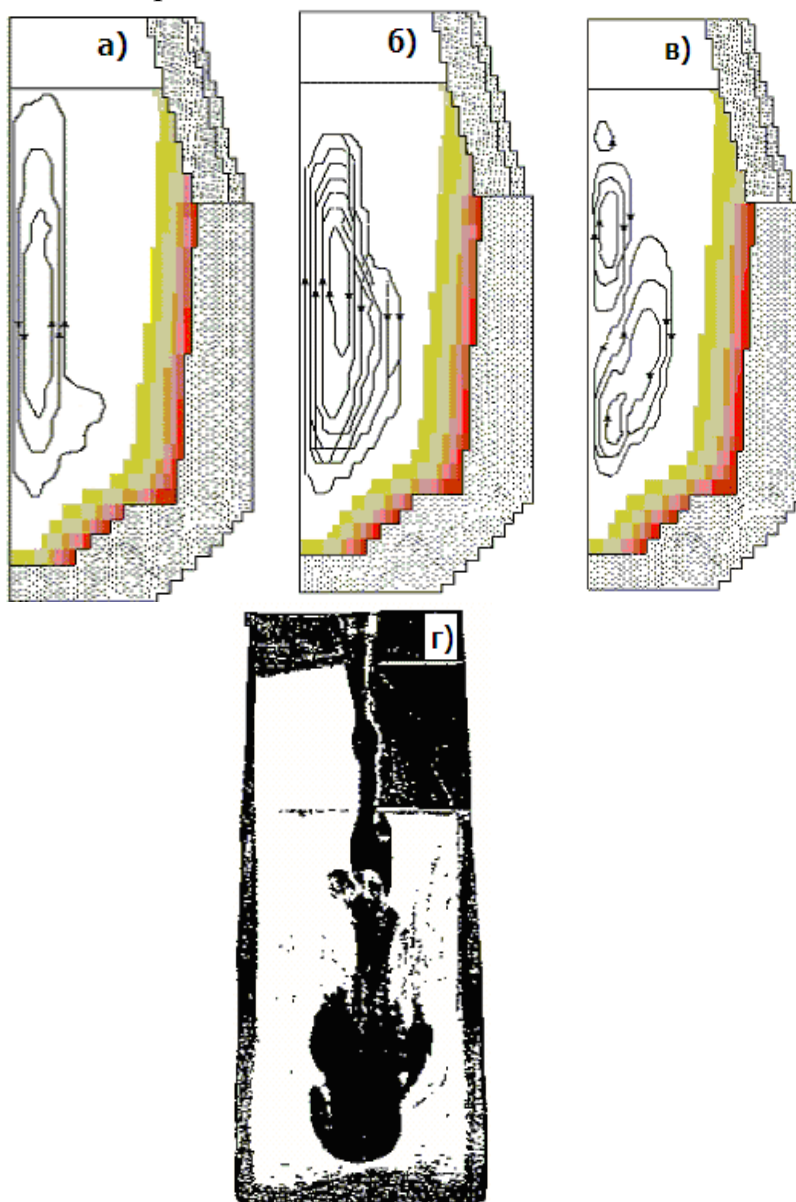


Рис. 5.2. Изменение функции тока после долива сверху расплава в изложницу.

Вычислительный эксперимент – моменты времени после долива металла: а)– 1 мин; б) – 2 мин; в) -3 мин; г) физическое моделирование заливки сверху [4, 5].

При этом (рис. 2,г) авторы [4, 5] установили, что «...Долив принципиально изменяет характер циркуляции расплава. За счет энергии струи первые порции окрашенной жидкости, вводимой по оси модели, внедряются в объем исходного расплава. При этом они тормозятся встречным потоком исходного расплава (который поднимается по оси модели) и, не достигнув дна, поворачивают на 180° , раскрываясь в форме перевернутого парашюта. Следующие порции доливаемого расплава достигают твердожидкой зоны донного конуса кристаллов. Здесь они движутся вначале горизонтально, как бы растекаясь по дну модели, а затем, достигнув боковых поверхностей фронта кристаллизации, поток разворачивается и медленно поднимается вверх».

Сопоставление результатов вычислительного эксперимента (рис. 5.2,а – рис. 5.2,в) и физического моделирования (рис.5.2,г) показывает качественное совпадение гидродинамической обстановки в период заливки сверху расплава до прибытия. Полученные данные позволяют рекомендовать математическую модель для проведения численных расчетов формирования МС и прогнозирования толщины поверхностного слоя легированной стали.

5.3. Гидродинамические процессы при формировании композитных слитков

Численное моделирование гидродинамических процессов в многослойном слитке показывает (рис. 5.3), что в зоне поступления расплава (зона – б) в изложницу происходит интенсивное его перемешивание и наблюдается сложная картина распределения поля скорости (рис. 5.3,а). В месте поступления расплава (зона – б) образуется вихрь, который вызван действием заливочной струи и который интенсифицирует передачу теплоты через стенку изложницы. В таких тепловых условиях формируется корочка твердой фазы (зона – 3).

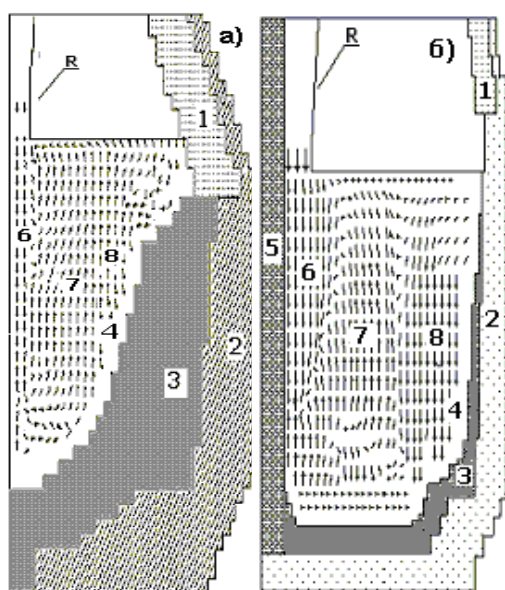


Рис. 5.3. Гидродинамические процессы при разливке сверху композитного слитка:

- а) многослойный слиток;
- б) слиток с внутренним холодильником.
- 1 – шамот, 2 – изложница,
- 3 – твердая фаза;
- 4 – двухфазная зона;
- 5 – внутренний холодильник;
- 6 – заливочная струя в расплаве;
- 7 – восходящие потоки в расплаве;
- 8 – нисходящие потоки расплава.

После выдержки металла в изложнице идет процесс образования слоя легированной стали необходимой толщины. Потом происходит долив расплава второго металла сверху (рис.5.3, а).

Проникновение заливочной струи в расплав происходит на глубину, которая не превышает 1,2 м, что качественно совпадает с экспериментальными данными Ефимова В.А [6, 7]. При этом величина скорости также коррелирует с экспериментальными исследованиями [6, 7].

Разливка металла сверху приводит к возникновению, как естественной тепловой конвекции – вследствие теплоотвода с внешних границ изложницы, так и вынужденной – механическое воздействие струи расплава (рис. 5.3). При формировании слитка с ВХ большое значение имеет влияние гидродинамических процессов на ход затвердевания (рис. 5.3,б). Распространение заливочной струи (б) в расплаве вызывает конвекцию во всем объеме расплава и, прежде всего, способствует нагреву ВХ (5) и изложницы (2). При этом вследствие теплоотвода через стенку изложницы затвердевает расплав, у фронта затвердевания образуется двухфазная зона (4). Происходит перераспределение температуры в объеме слитка за счет восходящих (более горячих) потоков расплава (7) и нисходящих (более холодных – зона 8) у стенки изложницы и затвердевающей корочки слитка (3).

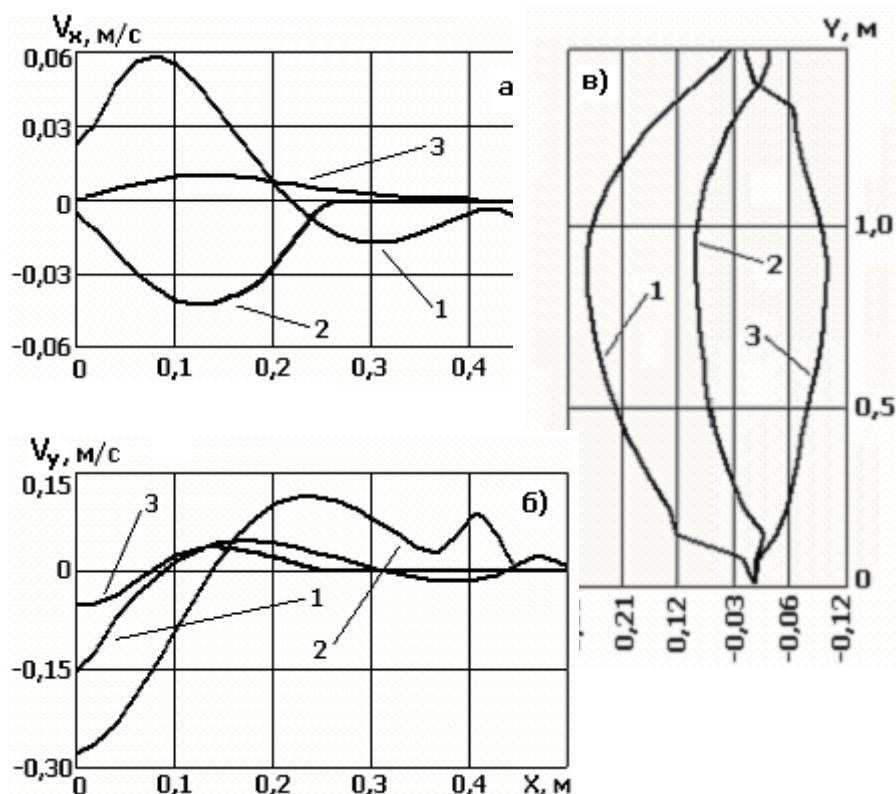


Рис. 5.4. Скорости движения расплава: а) горизонтальная составляющая – на горизонтах: 1 – 1,7м; 2 – 2,4м. 3 – 1,12м
 б) вертикальная составляющая для горизонтов 1 – 2,4м; 2 – 1,7м; 3 – 1,12м;
 в) горизонтальная составляющая на вертикалях: 1 – 0,15м; 2 – 0,3м от оси слитка; 3 – 0,45м от оси слитка у боковой стенки слитка

Изменение вертикальной скорости при заливке сверху (рис. 5.4,а) пристеночной области скорости меньше, чем при заливки снизу (рис. 5.4.2,в).

Это связано с тем, что направление восходящих потоков (7) при сифонной заливке и заливочной струи совпадают.

При этом математическое моделирование процесса заливки и кристаллизации расплава показало, что проникновение заливочной струи в расплав (при заливке сверху) происходит на глубину, которая не превышает 1,2 м, что качественно согласуется с опытными данными Ефимова В.А. [6, 7], где затопленная струя (разливка сверху) проникает на глубину 1м.

Гидродинамическая обстановка изменяется при окончании заливки стали в изложницу. При этом наблюдается формирование на оси слитка потоков расплава направленных вверх и у боковой поверхности направленных вниз, которые вызваны только тепловой конвекцией, что и отражается на изменении знака вертикальной скорости на различных горизонтах (рис. 5.4,в).

В подтверждение приведенных выше результатов конвективного характера движения расплава в затвердевающем слитке приведем изменение вертикальной скорости в зависимости от высоты слитка (рис. 5.4,в).

Необходимо отметить, что не только в вертикальной (рис. 5.4,б), но и в горизонтальной плоскости (рис. 5.4,б) происходит изменение на противоположное направленное движение на различных вертикалях вертикальной составляющей скорости. Это хорошо видно по характеру изменения вертикальной составляющей скорости на оси слитка (кривая 1) и у стенки изложницы (кривая 3).

5.4. Теплофизические процессы при формировании композитных слитков

Теплофизические процессы являются определяющими при формировании многослойных слитков, когда из расплава образуется твердая фаза металла [1-3]. Теплообмен при формировании **многослойного слитка** показан на примере изменения энтальпии жидкой лунки (кривая – 1) слитка, твердой части слитка (кривая – 2) и формы (кривая – 3) изложницы (рис. 5.5).

При этом энтальпия в жидкой лунке определяется согласно формуле

$$E_{\tau} = \frac{1}{V_{л}} \int_{V_{л}} c_{ж} \rho_{ж} (1 - \xi) T dV \quad (5.6)$$

в твердой части слитка

$$E_{\tau} = \frac{1}{V_{\tau}} \int_{V_{\tau}} c_{\tau} \rho_{\tau} \xi T dV \quad (5.7)$$

и двухфазной области слитка

$$E_{\tau} = \frac{1}{V_{д.ф.з.}} \int_{V_{д.ф.з.}} [c_{ж} \rho_{ж} (1 - \xi) T + c_{\tau} \rho_{\tau} \xi T] dV \quad (5.8)$$

где V_L – объем жидкой лунки в слитке; V_T – объем твердой части слитка; $V_{д.ф.з.}$ – объем двухфазной зоны в слитке.

Сравнение изменения энтальпии расплава при различной температуре затвердевания показывает, что при увеличении температуры заливки энтальпия жидкой лунки не только увеличивается, но и увеличивается неравномерность изменения. При этом наблюдаются сходные в изменении энтальпии при температуре расплава 1570°C (рис. 5.5,а) и при 1640°C (рис. 5.5,б) – в обоих случаях в период сифонной заливки расплава и заливки сверху наблюдается увеличение энтальпии.

Кроме того, после 60 минут затвердевания МС увеличивается энтальпия жидкой лунки по той причине, что в это время увеличивается затвердевание МС (рис. 5.4,а) и (рис. 5.5,б). При образовании твердой фазы слитка выделяется теплота кристаллизации и за счет этого увеличивается теплоотвод как в жидкую лунку (кривая – 1), так и в твердую часть слитка (кривая – 2), а в форме (кривая – 3) не наблюдается увеличения энтальпии, т.к. в слитке уже затвердел достаточно большой слой металла, который и аккумулирует теплоту кристаллизации.

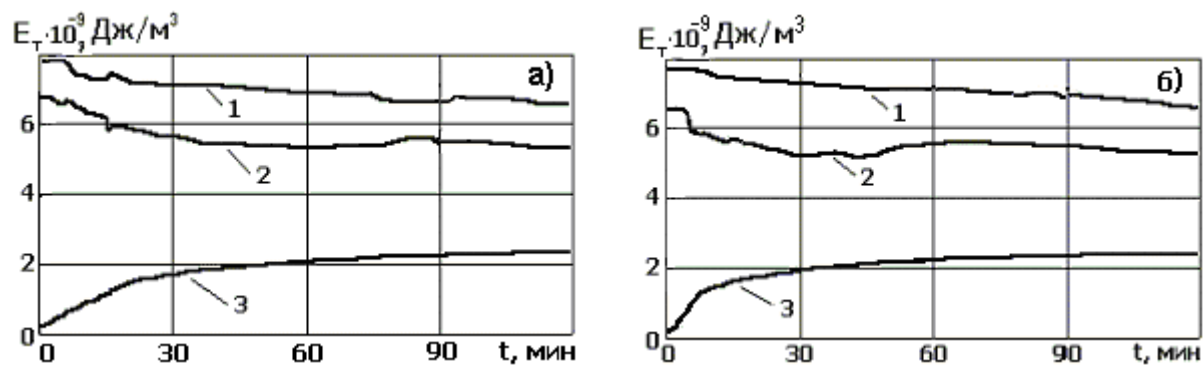


Рис. 5.5. Изменение энтальпии при температуре заливки расплава:

а) многослойный слиток – 1570°C; б) обычный слиток – 1570°C.

1 – жидкая лунка слитка; 2 – твердая часть слитка; 3 – форма изложницы

Изменение размера кристалла по высоте слитка происходит (рис. 5.5) таким образом, что величина кристалла уменьшается с верхней части слитка к поддону. Причем у оси слитка размер кристалла уменьшается от верхней части слитка к поддону 2-3 раза, а у боковой поверхности уменьшение составляет в 2 раза. Следовательно, на боковой поверхности слитка распределение размера кристалла по высоте слитка происходит более равномерно, чем на оси слитка.

Представим сравнительный анализ формирования **армированного и обычного слитка** при влиянии конвекции и при ее отсутствии (рис. 5.5).

Рассмотрим затвердевание ВХ диаметром 80мм и начальной температурой 20°C. Распределение температуры в слитке после 10 минут затвердевания без влияния гидродинамики (рис.5.6,а) показывает, что температура расплава в

изложнице больше на 50°C - 80°C по сравнению со случаем, когда гидродинамические процессы учитываются в расплаве (рис.5.1,а и рис.5. 6,б).

Это связано с тем, что конвекция в расплаве способствует отводу теплоты через внешние границы слитка и расплав охлаждается. При отсутствии гидродинамических процессов ВХ прогревается не равномерно (рис. 5.6,а), а тепловая конвекция способствует более равномерному распределению температуры в ВХ по его высоте (рис. 5.6,б).

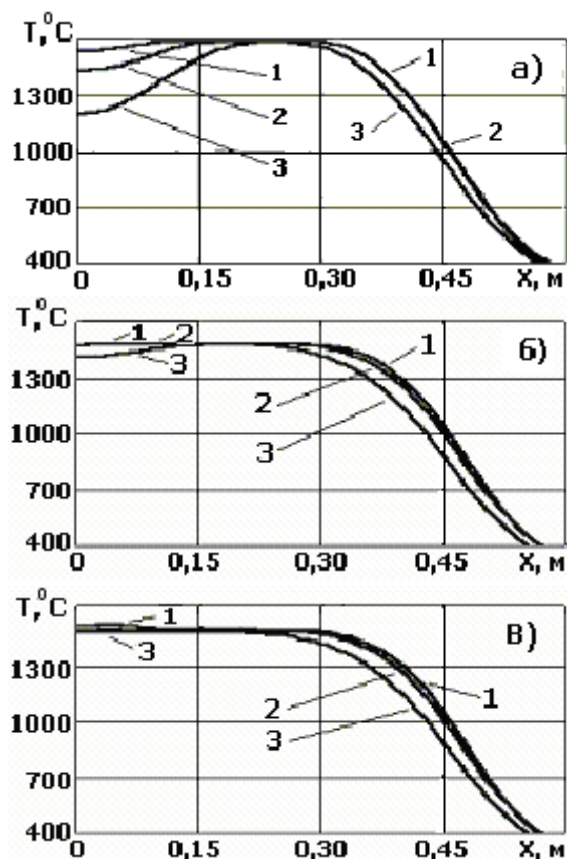


Рис. 5.6. Влияние гидродинамики на формирование армированного слитка. а) температура слитка с ВХ без учета влияния гидродинамики; б) температура слитка с ВХ с учетом влияния гидродинамики; в) температура обычного слитка при влиянии гидродинамики. На горизонтах от дна слитка: 1 – верхняя часть слитка – 2,1м; 2 – середина слитка 1,4м; 3 – нижняя часть слитка – 0,6м.

Сравнение затвердевания обычного слитка (рис. 5.6, в) и армированно-го слитка (рис. 5.6,б) при воздействии гидродинамических процессов и тепловой конвекции показывает, что наибольшее понижение температуры (50°C – 80°C) расплава происходит в месте ввода ВХ, а уже на расстоянии 0,3м от оси слитка это понижение температуры выражено меньше (10°C – 20°C).

Следовательно, перемешивание расплава при заливке, а также тепловая конвекция и влияние ВХ, способствуют понижению температуры в расплаве на 50°C – 80°C , как в зоне расположения внутреннего холодильника, так и в других областях армированного слитка.

Влияние тепловой конвекции на теплоперенос в системе внутренний холодильник – расплав отличается в различных зонах слитка (рис. 5.7). Рассмотрим особенности затвердевания слитков с ВХ диаметром 40мм и 120 мм (т.к. они очень отличаются по величине). В данном случае (рис. 5.7,а) при ВХ диаметром 40мм еще не снят перегрев расплава, и изменение температуры на горизонтах происходит в довольно больших пределах по всему армирован-

ному слитку. Отметим, что в верхней части армированного слитка наблюдается немонотонный характер изменения температуры. Связано это не только с присутствием ВХ на оси слитка, но и с тем, что размер ВХ не очень велик (диаметр 40мм). Это означает, что теплоотвод в тело ВХ влияет на интенсификацию тепловой конвекции, но не может стабилизировать распределение поле температуры в армированном слитке.

Между тем, для ВХ диаметром 120мм изменение температуры на горизонтах отличается тем, что в этом случае быстрее происходит охлаждение расплава у ВХ (рис. 5.7,б). Поле температуры имеет стабильный характер и изменяется монотонно. Можно сказать, что масса ВХ благоприятствует отводу теплоты с расплава и организации более равномерному распределению температуры в слитке, что должно сказываться на более однородной структуре затвердевающего металла.

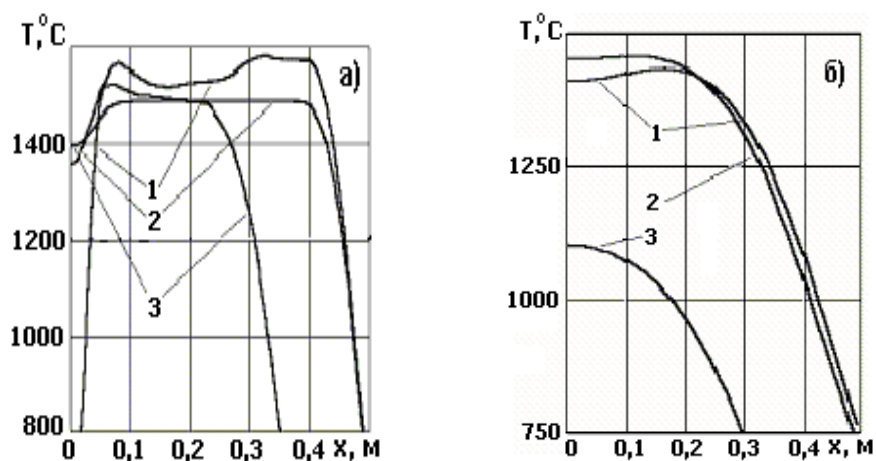


Рис. 5.7. Влияние конвективного теплопереноса на изменение температуры по горизонтали (после 6 минут затвердевания):
а) – 40мм; б) – 120мм.

1 – верхняя часть слитка – 2,1м; 2 – середина слитка – 1,4м;
3 – нижняя часть слитка – 0,6м.

Отметим, что проводились расчеты по затвердеванию армированного слитка с внутренним холодильником более 120мм, но они показали, что температура у поверхности ВХ меньше, чем солидус стали. Поэтому возникает опасность расслоения металла в месте контакта ВХ с остальным слитком.

Следовательно, применение ВХ с диаметром 120мм делает возможной организацию более равномерного распределения температуры в армированном слитке, а диаметр ВХ 40мм не может стабилизировать равномерное распределение температуры.

Изучим особенности затвердевания **армированного слитка** на примере нагревания и плавления внутреннего холодильника диаметром 40мм. На рис. 5.8,а показано распределение температуры для различных горизонтов. Отметим, что (рис. 5.8,в) на нижнем горизонте (у поддона) ВХ нагревается слабее, и в дальнейшем температура его поверхности уменьшается, что может отрица-

тельно сказывается на монолитности соединения ВХ и заливаемого металла. При этом возможное нарушение монолитности происходит в самом низу слитка и идет в обрыз, поэтому в дальнейшем это не отражается на качестве стали.

В верхней (рис. 5.8,б) части слитка такого падения температуры во ВХ не наблюдается. Практически все три слоя: поверхность ВХ, его внутренний слой и слой расплава, прилегающий к поверхности ВХ – имеют одну и ту же температуру.

Таким образом, при диаметре ВХ 40мм расплав слабо охлаждается у поверхности ВХ, т.к. масса ВХ относительно не велика. При этом величина теплового потока от расплава достаточна, чтобы прогреть все слои ВХ и даже в некоторых местах его расплавить.

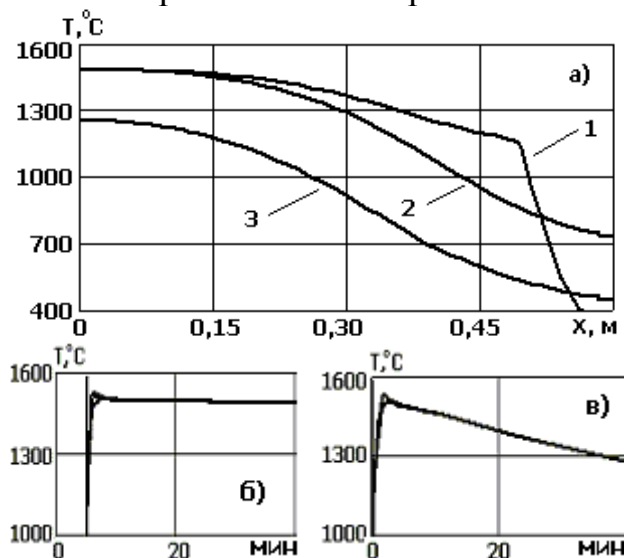


Рис. 5.8. Температура в армированном слитке (а) с ВХ диаметром 40мм на различных горизонтах: 1 – 0,8м; 2 – 1,5м; 3 – 2,4м. Нагревание и плавление ВХ диаметром 40мм: б) – верхняя часть слитка; в) – нижняя часть слитка. 1 – на границе корочка ВХ- расплав; 2 – на внешнем слое ВХ; 3 – на внутреннем слое ВХ.

Формирование армированного слитка с диаметром ВХ 120 мм отличается от слитка с диаметром ВХ 40мм, что отражено в распределении температуры ВХ на различных его участках. При теплопередаче во ВХ диаметром 120мм (рис. 5.9) градиенты температуры во ВХ и у поверхности увеличиваются, а температура уменьшается. Причем в нижней части слитка (рис. 5.8,в) расплав охлаждается больше, чем в верхней его части.

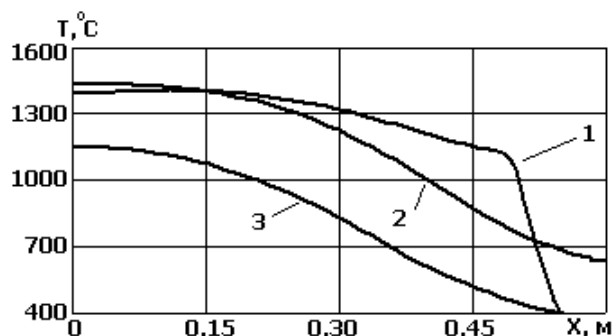
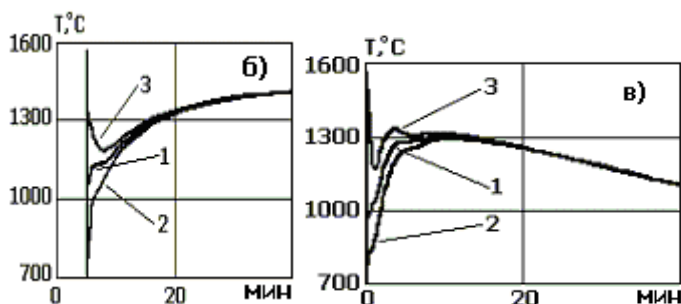


Рис. 5.9. Температура в армированном слитке (а) с ВХ диаметром 120мм на различных горизонтах: 1 – 0,8м; 2 – 1,5м; 3 – 2,4м. Нагревание и плавление ВХ диаметром 120мм:



б) – верхняя часть слитка;
 в) – нижняя часть слитка.
 1 – на границе корочка
 ВХ – расплав;
 2 – на внешнем слое ВХ;
 3 – на внутреннем слое ВХ.

Наибольшее различие температуры в слоях ВХ наблюдается в период заливки расплава, в дальнейшем в ходе развития теплопереноса в слитке ВХ прогревается, и температура в рассматриваемых слоях ВХ выравнивается. Т.е. увеличение диаметра ВХ до 120мм понижает большей мере температуру на границе расплав – внутренний холодильник в сравнении с предыдущим вариантом.

Следовательно, при затвердевании армированного слитка с диаметром ВХ от 40мм до 120мм обеспечивается монолитность его соединения с заливаемым расплавом.

5.5. Макроструктура композитного слитка

Теплофизические процессы во многом определяют размер кристаллов в слитке. Размер кристаллического зерна при традиционном рассмотрении (в первом приближении) пропорционален корню квадратному от времени затвердевания данного объема стали.

Рассмотрим изменение размера кристаллов в многослойном слитке. При этом необходимо учесть, что размер кристаллического зерна пропорционален корню квадратному от времени затвердевания данного локального объема стали [7, 8]. Приближенный расчет дендритного строения металла имеет вид:

$$d_1 = A\tau_{лок}^{1/2}, \quad (5.9)$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от теплофизических параметров стали; $\tau_{лок}$ – время затвердевания локального объема стали.

Отметим, что значение коэффициента пропорциональности найти для каждой марки стали не просто. Поэтому для характеристики кристаллической структуры будем использовать относительный размер кристалла d_1 , как часть от максимального его значения в слитке $\bar{D} = d_1/d_{max}$.

Оценки дендритного строения металла производится на основании опытов, представлены Ю.А. Самойловичем [7, 8]. Обработка результатов опытов на слитках показывает, что ветви дендрита первого d_1 в зависимости от градиента температуры G в области роста дендрита и скоростью затвердевания U определяются из соотношения:

$$d_1 = k_1 U^{-0.26} G^{-0.72}, \quad (5.10)$$

где $k_1=29$ – для ветвей первого порядка.

Сравнения результатов расчетов по формулам (5.9) и (5.10) приводит к необходимости соответственно расчеты по формуле (5.10) привести к относительному размеру, как и по формуле (5.9).

Сравнение размеров зерна для обычного и многослойного слитка (рис.5.9, а) показывает, что долив второго металла приводит к укрупнению размера кристаллов.

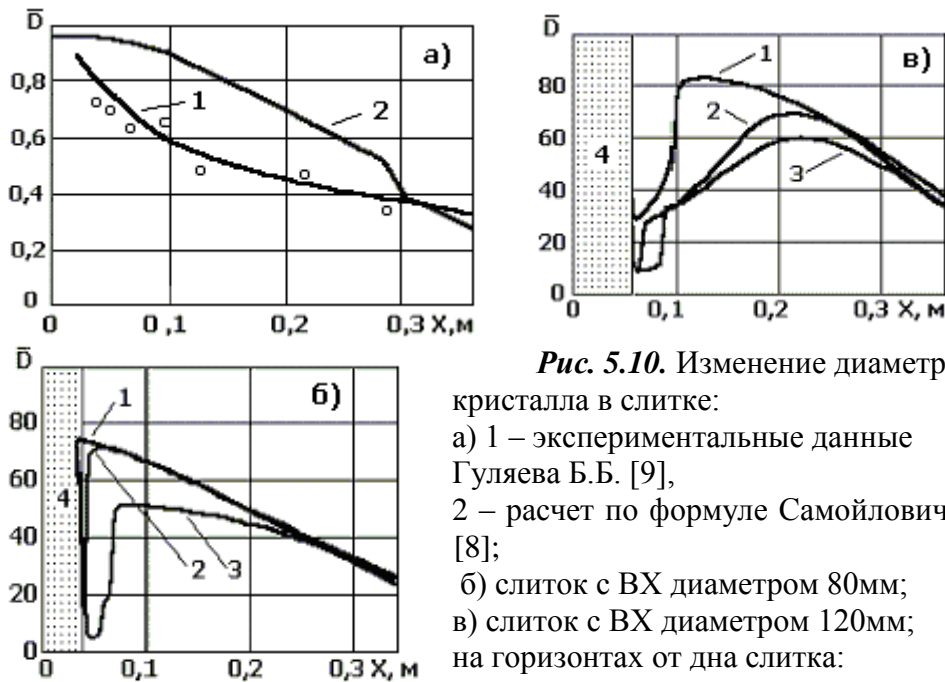


Рис. 5.10. Изменение диаметра

кристалла в слитке:

- а) 1 – экспериментальные данные Гуляева Б.Б. [9],
2 – расчет по формуле Самойловича Ю.А. [8];
- б) слиток с ВХ диаметром 80мм;
- в) слиток с ВХ диаметром 120мм;
- на горизонтах от дна слитка:
1 – верхняя часть слитка – 2,1м;
2 – середина слитка- 1,4м;
3 – нижняя часть слитка – 0,6м;
4 – внутренний холодильник

Такое распределение по размерам кристаллов качественно согласуется с известными теоретическими и экспериментальными данными [7-9]. Полученные результаты вычислительного эксперимента [1-3] по определению размеров кристаллов сравнивались с результатами Б.Б. Гуляева [9] (рис.5.10, б). Качественное совпадение результатов говорит об адекватности математической модели, описывающей структуру слитков.

Проводилось сравнение кристаллической структуры армированного слитка с ВХ диаметром 80мм – (рис. 5.10,б) и диаметром 120мм (рис. 5.10,в). Полученное распределение размера кристаллов обусловлено тем, что в месте ввода ВХ происходит охлаждение расплава более интенсивно, чем в других областях расплава. При этом, чем диаметр ВХ больше, тем больше поток теплоты идет во внутренний холодильник и, следовательно, происходит увеличение температурных градиентов и уменьшение размеров кристаллов согласно приведенной формуле (5.10).

Таким образом, структура стали определяется как конвективным теплопереносом в расплаве, так и градиентами температуры в твердой части слитка и влиянием на эти процессы внутреннего холодильника.

Изменение размера кристалла по высоте слитка происходит (рис. 5.11) таким образом, что величина кристалла уменьшается с верхней части слитка к поддону. Причем у оси слитка размер кристалла уменьшается от верхней части слитка к поддону 2–3 раза, а у боковой поверхности уменьшение составляет в 2 раза. Следовательно, на боковой поверхности слитка распределение размера кристалла по высоте слитка происходит более равномерно, чем на оси слитка.

Распределение относительного размера кристалла на границе МС (рис. 5.11) показывает, что по высоте слитка размер изменяется на 30-40%. Распределение размера дендрита относительно на границе образования второго слоя МС (кривая 2) и до заливки второго металла (кривая 3) показывает, что размер дендрита после заливки второго металла увеличивается (кривая 2). Для сравнения показано распределение размера кристалла у поверхности слитка (кривые 4 и 5).

Таким образом, структура стали определяется как конвективным теплопереносом в расплаве, так и градиентами температуры в твердой части слитка и влиянием на эти процессы внутреннего холодильника.

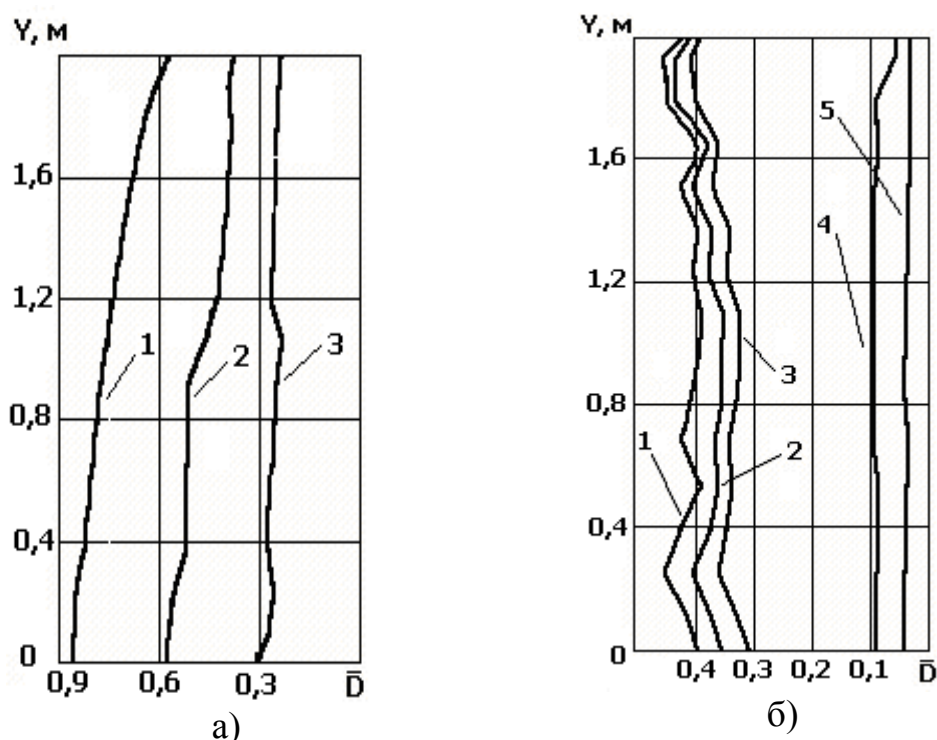


Рис. 5.11. Относительный диаметр зерна в слитке на различных вертикалях многослойного слитка.

- а) – 1 – на оси слитка; 2 – в средней части расчетной области; 3 – у боковой поверхности слитка;
- б) 1 – внутренний слой многослойного слитка; 2 – граница многослойного слитка; 3 – внешняя граница МС; 4 – поверхность слитка (боковая сторона); 5 – поверхность слитка (верхняя сторона);

5 – примыкающий слой к поверхности слитка.

Отметим, что на формирование структуры металла влияют многие факторы: градиент температуры, время формирования кристалла, распределение примеси, а также конвективный теплообмен и др. Влияние конвекции на структуру слитка рассмотрим на примере распределения относительного диаметра \bar{D} кристалла (рис. 5.11).

Сравнение изменения размера кристалла для обычного и МС (рис. 5.12,б) показывает, что долив второго металла приводит к увеличению размера кристалла. Такое распределение по размерам кристаллов качественно согласуется с принятыми теоретическими и опытными данными [7-9].

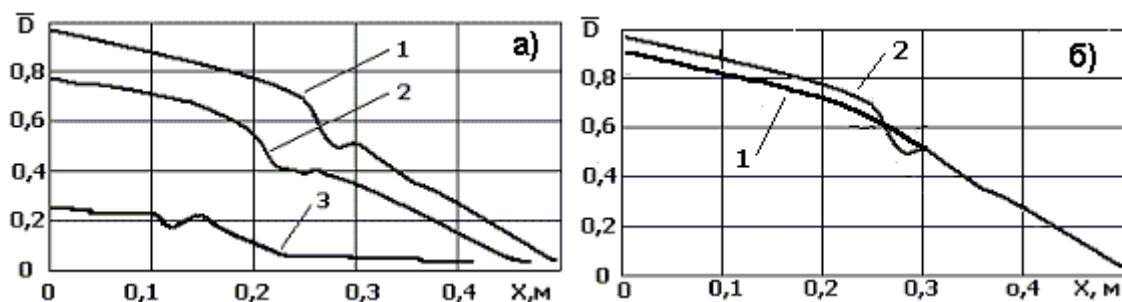


Рис. 5.12. Изменение диаметра зерна в слитке:

а) относительного диаметра зерна на горизонтах:

1 – верхняя часть слитка; 2 – средняя часть слитка; 3 – нижняя часть слитка;

б) размерного диаметра зерна слитка: 1- обычный слиток;

2 – многослойный слиток.

в): 1 – экспериментальные данные Гуляева Б.Б. [9];

Температура заливаемого расплава 1570°C. Время выдержки 10 минут.

При этом на оси слитка размер кристалла уменьшается от верхней части слитка к поддону в 2–3 раза, а по высоте боковой поверхности размер кристалла уменьшается от верха к низу в 2 раза.

На основе математического моделирования теплопереноса при затвердевании композитных слитков получено распределение размера дендритного кристалла (рис. 5.12, в) в зависимости от градиента температуры и скорости затвердевания в слитке (формула 5.10). Эти результаты сравнивались с результатами, полученными Гуляевым Б.Б. [9]. Качественное совпадение результатов показывает адекватность математической модели реальным затвердевающим слиткам и отливкам.

На рис. 5.13 представлены численный расчет по математической модели формирования многослойного слитка (кривая – 1) и экспериментальные результаты (кривая – 2) продвижения фронта затвердевания. Следует отметить, что отличие результатов вычислительного эксперимента по продвижению фронта затвердевания слитка и эксперимента на реальном слитке не превышает для различных моментов времени 20%.

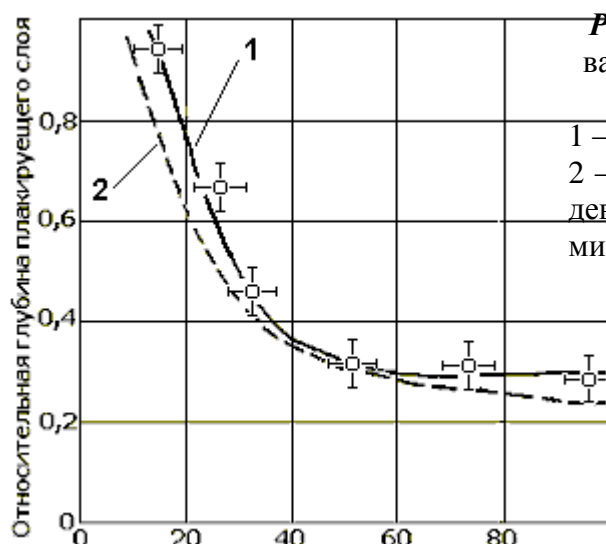


Рис. 5.13. Изменение толщины легированного слоя по длине слитка из композиции хромистых сталей:

1 – опытный слиток [35];
2 – вычислительный эксперимент затвердевания многослойного слитка. Время 13 мин 15с.

Анализ влияния гидродинамических процессов и теплопереноса на размер кристаллов показал, что при формировании слитка с **ВХ диаметром 80мм конвекция** приводит к более быстрому снятию перегрева и измельчению зерна (рис. 14,б), чем при отсутствии конвекции (рис. 14,а).

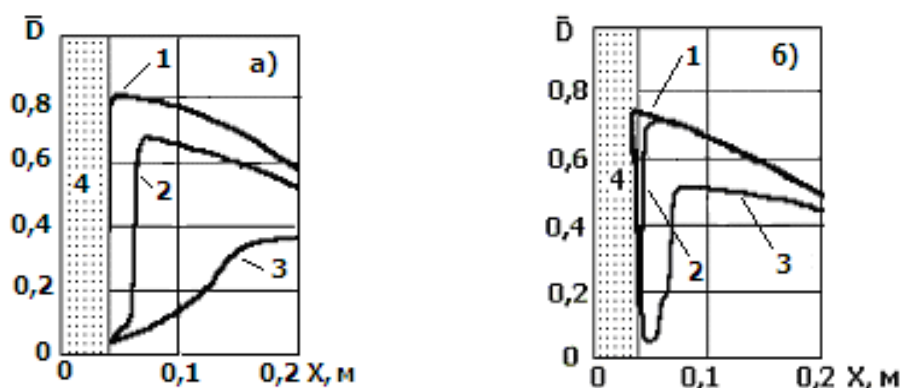


Рис. 5.14. Изменение относительного диаметра кристалла (в относительных долях) для слитка с внутренним холодильником диаметром 80мм:

а) слиток с ВХ и без учета гидродинамических процессов;

б) слиток с ВХ и с учетом гидродинамических процессов;

Заштрихованная область 4 – внутренний холодильник.

На горизонтах от дна слитка: 1 – верхняя часть слитка – 2,1м;

2 – середина слитка – 1,4м; 3 – нижняя часть слитка – 0,6м.

Если рассмотреть в каких областях изменяется структура затвердевающей, за счет конвекции расплава, то наибольшие изменения, наблюдаются у поверхности ВХ. Это приводит к тому, что в верхней части слитка у поверхности ВХ размер кристаллов уменьшается, а в нижней части слитка увеличивается.

Вместе с определением размера дендритной структуры исследовались и структурные зоны в слитках при данных условиях кристаллизации МС. При этом учитывалось, что на формирование структурных зон и морфологии кристал-

лов основное влияние оказывает: величина температурного градиента, скорость роста дендритов, скорость кристаллизации слитка и степень перегрева расплава.

Согласно [6], различные виды кристаллической макроструктуры формируются в зависимости от значения температурного градиента. Так в соответствии с полученными результатами вычислительного эксперимента проведенного на основе математической модели формирования МС, получены графики градиента температуры и соотношения $G/\sqrt{V_R}$ (рис. 5.14). При этом определены следующие структурные зоны в затвердевающем МС:

- корковая зона слитков $G \geq 50-100$ град/см, которая образуется в виде мелких равноосных кристаллов (область – А), которая расположена у боковой области слитка. И является следствием быстрого теплоотвода в стенку изложницы в начале кристаллизации слитка;
- зона транскристаллизации – $G = 20-50$ град/см, которая образуется в виде столбчатых кристаллов, простирается (область – Б) на большую часть слитка;

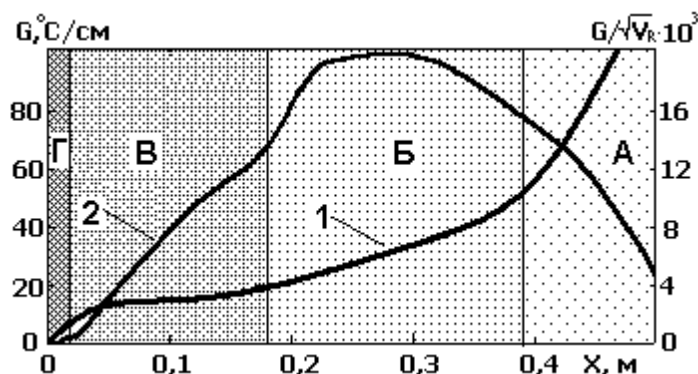


Рис. 5.15. Изменение структурных зон слитка в зависимости от градиента кристаллизации и скорости роста дендрита:

- А) – корковая зона слитка; Б) – зона транскристаллизации;
- В) переходная зона от зоны транскристаллизации до зоны равноосных кристаллов (различно ориентированные дендриты);
- Г) зона равноосных (глобулярных) кристаллов.

1 – градиент температуры; 2 – соотношение величин – $G/\sqrt{V_R}$.

- переходная зона $G = 5-20$ град/см от зоны транскристаллизации до зоны равноосных различным образом ориентированных кристаллов, расположена (область – В) ближе к центральной части слитка;
- зона равноосных (глобулярных) кристаллов – $G = 1 – 5$ град/см, которая образуется в центральной части слитка.

Таким образом, полученное расположение структурных зон является типичным для затвердевающих слитков, а их отличие происходит ввиду технологических отличий затвердевания многослойного слитка.

Поэтому расчеты, произведенные по представленной модели, позволяют прогнозировать расположение различных кристаллических структур в затвердевающем слитке.

Таким образом,

- разработана математическая модель гидродинамических и теплофизических процессов при формировании многослойного и армированного стального слитков, которая позволяет определить поля температуры, скорости расплава, твердой фазы при различных режимах разлива расплава в изложницу и в ходе затвердевания слитка;
- сопоставление результатов математического и физического моделирования свидетельствует об адекватности математической модели формирования многослойного и армированного слитка;
- на основании расчета градиентов температуры и скорости затвердевания получена дендритная структура многослойного слитка и армированного слитка в зависимости от размера внутреннего холодильника;
- получены температурные поля армированного слитка на различных горизонтах для различных размеров внутреннего холодильника. Исследован процесс нагрева и кинетика плавления внутреннего холодильника. Определены размеры внутреннего холодильника, которые обеспечивают монолитность его соединения с металлом в армированном слитке.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Мелихов В.М. Численное исследование теплообменных процессов при формировании / В.М.Мелихов // Математичне моделювання. – 2010. – №2(24). – С. 59-62.
2. Мелихов В.М. Математическое моделирование теплообменных процессов и гидродинамики при формировании армированного слитка. Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. – Випуск 1. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2010. – С.124-134.
3. Затвердевание металлических композиций: производство и моделирование / [В.А.Лейбензон, Ф.В.Недопекин, В.В.Кондратенко, В.М.Мелихов и др.]. – Донецк: Юго-Восток, 2005. – 228 с.
4. Опыт производства металлопроката из двухслойных сталей / Т.М. Титова, В.М.Кондратенко, С.Н.Поляков [и др.] // Процессы литья. – 1997. – № 4. – С. 23-26.
5. Стовпченко А.П. Некоторые особенности формирования литых композитов / А.П.Стовпченко, Т.М.Титова // Процессы литья. – 1999. – №2. – С.65-71.
6. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов – М.: Металлургия. – 552 с.
7. Ефимов В.А. Современные технологии разливки и кристаллизации сплавов. / В. Ефимов, А. Эльдарханов – М.: Машиностроение, 1998. – 359 с.
8. Самойлович Ю. А. Стальной слиток. Затвердевание и охлаждение Т. 2 в 3-х т. / Ю.А.Самойлович, В.И.Тимошпольский, И.А.Трусова, В.В.Филиппов. Под общ. ред. В.И.Тимошпольского, Ю.А.Самойловича. — Мн.: Белорусская наука, 2000. – 637 с.
9. Самойлович Ю.А. Кристаллизация слитка в электромагнитном поле / Ю.А.Самойлович – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
10. Гуляев Б.Б. Литейные процессы / Б.Б.Гуляев. – М.: Машгиз, 1960. – С.274.

6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОМЕЖУТОЧНОМ КОВШЕ

6.1. Обзор существующих математических моделей гидродинамических, теплофизических и массообменных процессов в промежуточном ковше

Так как эффективность обработки металла в промежуточном ковше во многом определяется природой движения жидкого металла в нем, различными исследователями были предприняты попытки изучения гидродинамических процессов в этом агрегате.

Распространенный подход к исследованиям этих процессов в промежуточном ковше – импульсный ввод индикатора с последующей регистрацией и анализом кривых распределения времени пребывания (в англоязычной литературе – Response Time Distribution или RTD). Достоинством такого подхода является достаточно простая реализация и возможность решать практические задачи проектирования промежуточных ковшей. Для проведения подобных исследований необходимо иметь физическую модель промежуточного ковша (обычно водяную), а для последующей математической обработки часто используются представления об идеализированных ячейках: идеального смещения и идеального вытеснения [1-12].

Для моделирования структуры потоков в различных агрегатах (в т.ч. и в промежуточных ковшах) используются одно- или двухпараметрические модели с обратным перемешиванием [1, 13-16]. Эффективные коэффициенты турбулентной диффузии (коэффициенты обратного перемешивания) определяются по кривым отклика модели или реального промежуточного ковша на импульсный ввод индикатора. Например, в работе [13] интенсивность перемешивания в промежуточном ковше с устройством для плазменного подогрева определяли на основе испытаний с вводом в жидкую сталь меди в качестве индикатора. По кривым отклика (т.е. по изменению содержания меди в металле на выходе из промежуточного ковша) определяли число Пекле, характеризующее процессы перемешивания в промежуточном ковше, и строили зависимость $Pe=f(N)$ (Pe – число Пекле, N – подводимая к нагревательному устройству мощность). При увеличении мощности нагревательного устройства с 0 до 700 кВт число Пекле уменьшилось с 9...10 до 7...8, что свидетельствует о росте интенсивности перемешивания за счет тепловой конвекции.

Многие задачи, связанные с рафинированием стали от неметаллических включений, решаются при помощи простых моделей, не связанных напрямую с теорией турбулентности.

В частности, в [14] для анализа процессов раскисления в промежуточном ковше использована однопараметрическая модель с обратным перемешиванием:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -v \frac{\partial C}{\partial x} + E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + R \quad (6.1)$$

где C – общее содержание кислорода в металле (%); R – суммарная скорость удаления неметаллических включений в покровный шлак и вторичного окисления; E – дисперсионный коэффициент (коэффициент обратного перемешивания). Авторы [14] связывают величину коэффициента обратного перемешивания с характеристиками перемешивания в промежуточном ковше (средняя диссипация кинетической энергии, число Пекле, Рейнольдса).

Аналогичный подход использован, в работе [15], где рассмотрены одно- и двухпараметрическая модель потока в приемной и раздаточной секции промежуточного ковша с разделительными перегородками. По данным [15], величина числа Пекле как для разливочной секции модели с перегородкой, так и для всего рабочего пространства без нее коррелирует с соотношением L/h . В первом приближении можно принять линейную зависимость $Pe = f(L/h)$. Результаты физического моделирования для разливочной секции промежуточного ковша с перегородками ($L/h < 3$) и всего рабочего пространства промежуточного ковша без перегородок ($L/h > 3,5$), описывается уравнением:

$$Pe \approx 3 \cdot \frac{L}{h} - 4.24, \quad (6.2)$$

где L – длина промежуточного ковша или раздаточной секции; h – высота уровня жидкости в приемной секции.

Очевидным недостатком как ячеечных, так и диффузионных моделей структуры потоков является трудность определения параметров (объема ячеек, эффективных коэффициентов диффузии) по конструктивным параметрам промежуточного ковша и режиму разливки без стадии собственно физического моделирования. Возможным путем совершенствования моделей структуры потоков является статистическая обработка экспериментальных данных, направленная на оценку зависимости характеристик перемешивания в ковше или его секциях от геометрических параметров ковша и режима разливки по аналогии с корреляциями, используемыми для проектирования химико-технологических агрегатов [16].

Адекватность математического моделирования обычно проверяется на основе сопоставления с результатами физического моделирования поля скоростей и структуры потоков [8, 17], поэтому большинство работ, посвященных математическому моделированию гидродинамики промежуточного ковша, включают и результаты физического моделирования.

При описании структуры потоков в промежуточном ковше (т.е. RTD-кривой) оценка параметров ячеек производится по кривым отклика, получаемым на водяных моделях, при импульсном вводе индикатора [1]. Несмотря на то, что эти модели являются преимущественно статистическими, их применение для чисто инженерных целей достаточно продуктивно.

Для секционированных промежуточных ковшей с достаточно чётко выделенными объёмами секций идеального смешения и идеального вытесне-

ния исследование влияния конструктивных факторов на распределение времени пребывания металла в ковше является достаточно продуктивным методом.

В ряде работ, касающихся гидродинамики промежуточного ковша, учитываются и тепловые процессы. Например, в [18] расчетным путем показана значительная роль естественных конвективных потоков в перемешивании верхних и нижних слоев стали при основных потерях тепла через поверхность ванны и стенки промежуточного ковша.

Развитие современных методов математического моделирования гидродинамических процессов породило обширное научное направление, базирующееся на решении базовых уравнений механики сплошных сред.

Результаты математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше при таком подходе обычно включают (при заданной геометрии системы и скорости вливающейся жидкости) следующие параметры [19]:

- распределение скоростей в потоках;
- пространственное распределение параметров турбулентности;
- температурные профили (изотермические поверхности);
- распределение по объему промковша индикаторов, вводимых во вливающийся в систему поток.

Наиболее развитые математические модели гидродинамики турбулентных потоков в промежуточном ковше включают следующие уравнения [8, 9, 19]:

- уравнение непрерывности;
- уравнение движения в сочетании с моделью турбулентности для введения турбулентной вязкости;
- уравнение конвективной теплопроводности;
- уравнение конвективной диффузии для описания распределения индикатора по объему.

Уравнение непрерывности и уравнение движения соответственно имеют вид [9, 19]:

$$\nabla(\rho \cdot \vec{u}) = 0 \quad (6.3)$$

$$\vec{u} \cdot (\nabla \rho \cdot \vec{u}) = -\nabla P - (\nabla \mu_{ef} - \nabla \vec{u}), \quad (6.4)$$

где \vec{u} – вектор скорости, имеющий три компонента, т.е. u_x, u_y, u_z ; p – давление; ρ – плотность; $\mu_{ef} = \mu + \mu_t$ – эффективная вязкость равная сумме молекулярной μ и турбулентной μ_t вязкостей.

Турбулентная вязкость μ_t обычно вычисляется с использованием k-ε модели турбулентности, при использовании которой необходимо решать два дополнительных дифференциальных уравнения [8, 9, 19].

Дифференциальное уравнение теплопроводности имеет вид [8, 9, 19]:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + (\vec{u} \cdot \nabla T) \right) = (\nabla k_{ef} \cdot \nabla T) \quad (6.5)$$

где C_p – удельная теплоемкость; T – температура; k_{ef} – эффективная удельная теплопроводность, представляющая собой сумму молекулярной теплопроводности k и турбулентной компоненты теплопроводности k_t , которая определяется соотношением:

$$C_p \mu_t / k_t = 1 \quad (6.6)$$

Распределение вводимого в систему индикатора описывается уравнением конвективной диффузии [8, 9, 19]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + (\vec{u} \cdot \nabla C) = (\nabla^2 D_{ef} C) \quad (6.7)$$

где C – концентрация индикатора; $D_{ef} = D + D_t$ – эффективный коэффициент диффузии, равный сумме коэффициента молекулярной диффузии D и коэффициента турбулентной диффузии D_t , определяемого из соотношения:

$$\mu_t / (\rho D_t) = 1 \quad (6.8)$$

При решении задач математического моделирования гидродинамических процессов в промежуточном ковше обычно принимают следующие допущения [19-21]:

- вектор скорости у твердых поверхностей нулевой;
- градиенты скорости в плоскостях симметрии и на свободных поверхностях должны равны нулю;
- напряжения сдвига у твердых поверхностей описываются ступенчатой функцией.

6.2. Физическая постановка задачи

Область исследования – промежуточный ковш (рис. 6.1) представляет отдельный резервуар [22]. Через открытый шиберный затвор и огнеупорную защитную трубу под свободную поверхность промковша происходит его наполнение жидким металлом из сталеразливочного ковша, а через отверстия разливочных стаканов в донной части расплав поступает в кристаллизаторы. В промежуточном ковше поддерживается заданный уровень расплава. Зеркало металла защищено шлаками умеренной основности, хорошо абсорбирующими продукты раскисления. Для предохранения контакта с воздухом и теплоизоляции емкости промковша предусмотрена крышка.

Основными мероприятиями, способствующими улучшению и стабилизации параметров однородности и качества расплава на входе в кристаллизатор являются улучшение теплоизолирующих свойств футеровки и теплоизолирующей шлаковой смеси, применение порогов и перегородок со специальными отверстиями в полости промковша для организации потоков металла, организация устройств для продувки аргоном в донной части ковша. Не исключена также возможность обработки модифицирующими реагентами (в основном кальцием), путем введения в расплав порошковой проволоки.

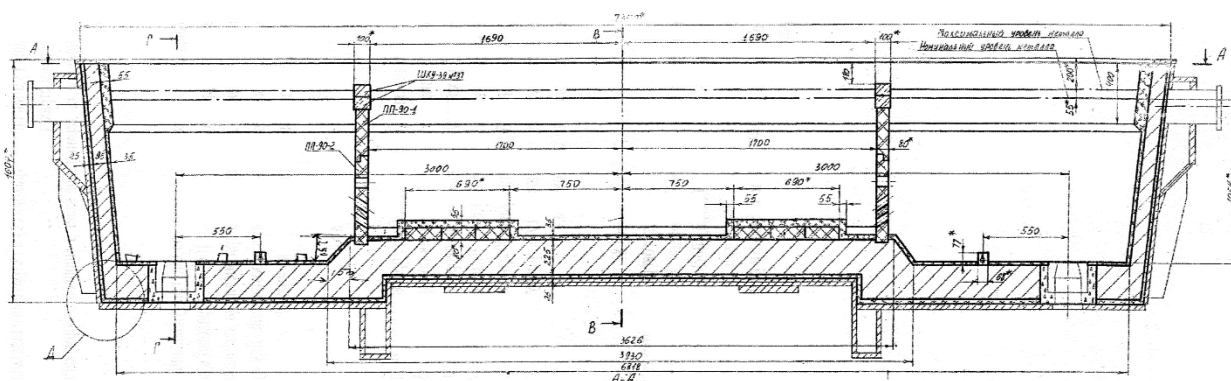


Рис. 6.1. Конструкция трехсекционного промежуточного ковша
ОАО «МК «Азовсталь»

Движение струй жидкого металла в полости промежуточного ковша определяется его конструктивными и технологическими параметрами:

- габаритами и внутренней геометрией (в том числе наличием и геометрией порогов или перегородок);
- диаметром защитной трубы и разливочных стаканов;
- физическими свойствами расплава;
- текущим уровнем расплава в промежуточном ковше;
- массовой скоростью истечения расплава из сталеразливочного ковша;
- постоянной массовой скоростью истечения расплава через разливочные стаканы;
- динамикой течения расплава в предшествующий момент времени.

В данной постановке задачи не будем рассматривать удар струи о дно промковша. Предполагаем, что промежуточный ковш наполнен расплавом не менее чем до минимального уровня переходных режимов разливки.

Температурный режим работы промковша определяется:

- температурой поступающего расплава;
- теплофизическими свойствами расплава, шлака и конструкционных материалов промежуточного ковша и его крышки;
- начальным распределением тепла в полости промковша и его стенках;
- тепловой обстановкой окружающей промковш среды;
- температурой и расходом дувяемого газа;
- динамикой тепловых процессов в предшествующий момент времени.

Таблица 6.1. Теплотехнические свойства огнеупорных материалов, применяемые на МНЛЗ №3, 4, 5 КЦ ОАО «МК «Азовсталь»

Материал	Плотность, г/см ³	Тепло- проводность, Вт/(м·К)	Удельная теп- лоемкость, Дж/(кг·К)
DALHIN AM-95/C	0,85	0,11 – 0,17	775 – 1230
DALCAST A-701	2,90	1,70 – 2,40	770 – 1205

BROLITEX BULK M-O-85	1,45	0,70 – 0,90	1120 – 1430
----------------------	------	-------------	-------------

Продувка аргоном жидкого металла в промежуточном ковше МНЛЗ является эффективным средством удаления неметаллических включений из жидкой стали. Фурма специальной конструкции устанавливается в донной части ковша перпендикулярно его главной оси. Предполагается, что газовые потоки в виде совокупности газовых пузырей, выполняя функцию газовой завесы, являются транспортирующим средством жидкого металла в зону раздела «металл-шлак», где и осуществляется процесс ассимиляции неметаллических включений жидким шлаком. При этом необходимо обеспечить такие размеры пузырьков аргона, которые не будут задерживаться на границе «металл-шлак» [23].

Для расчета максимального радиуса пузырька, способного задерживаться на границе раздела, можно применить формулу:

$$R = \frac{\frac{\rho_m \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_a}} + 2\Delta R \cdot \rho_m - \frac{\rho_a \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_a}}}{3a}}{\frac{2}{3}(\rho_m + \rho_{ш} - 2\rho_a)}}{\pm \sqrt{\frac{\frac{\rho_m \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_a}} + 2\Delta R \cdot \rho_m - \frac{\rho_a \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_a}}}{3a}}{\frac{4}{3}(\rho_m + \rho_{ш} - 2\rho_a)}} + \frac{\sigma_{2-3} - \frac{\Delta R \cdot \rho_m \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{1-2}}{\rho_m - \rho_a}}}{a}}{\frac{1}{3}(\rho_m + \rho_{ш} - 2\rho_a)}}}} \quad (6.9)$$

где R – радиус пузырька, м; ΔR – толщина стенки, окружающей пузырь, м; $\rho_a, \rho_m, \rho_{ш}$ – плотность аргона, металла и шлака, кг/м³; σ_{1-2} – величина межфазного натяжения на границе «газ-металл», МДж/м²; σ_{2-3} – величина межфазного натяжения на границе «металл-шлак», МДж/м²; a – коэффициент сопротивления среды ($a \sim 1,3$).

Расчеты проведенные по формуле (6.9) и приведенные в [24], показывают, что пузырьки газа диаметром до 10 мм не обладают достаточной подъемной силой для совершения работы перехода через поверхность раздела «металл-шлак», могут задерживаться на этой границе, вследствие чего может образоваться прослойка инертного газа, которая может оказывать влияние на протекание физико-химических реакций, обуславливающих удаление неметаллических включений из жидкой стали.

Рассмотрим схему движения газового пузырька от момента его зарождения до удаления через слой шлака (рис. 6.2). При этом предполагается, что температура газового пузырька в момент его отрыва и на выходе из слоя шлака, составляющая, соответственно, 300 К и 1800 К, и абсолютное давле-

ние равно величине $1,64 \text{ кг/см}^2$ (сумма атмосферного давления и давления столба жидкого металла).

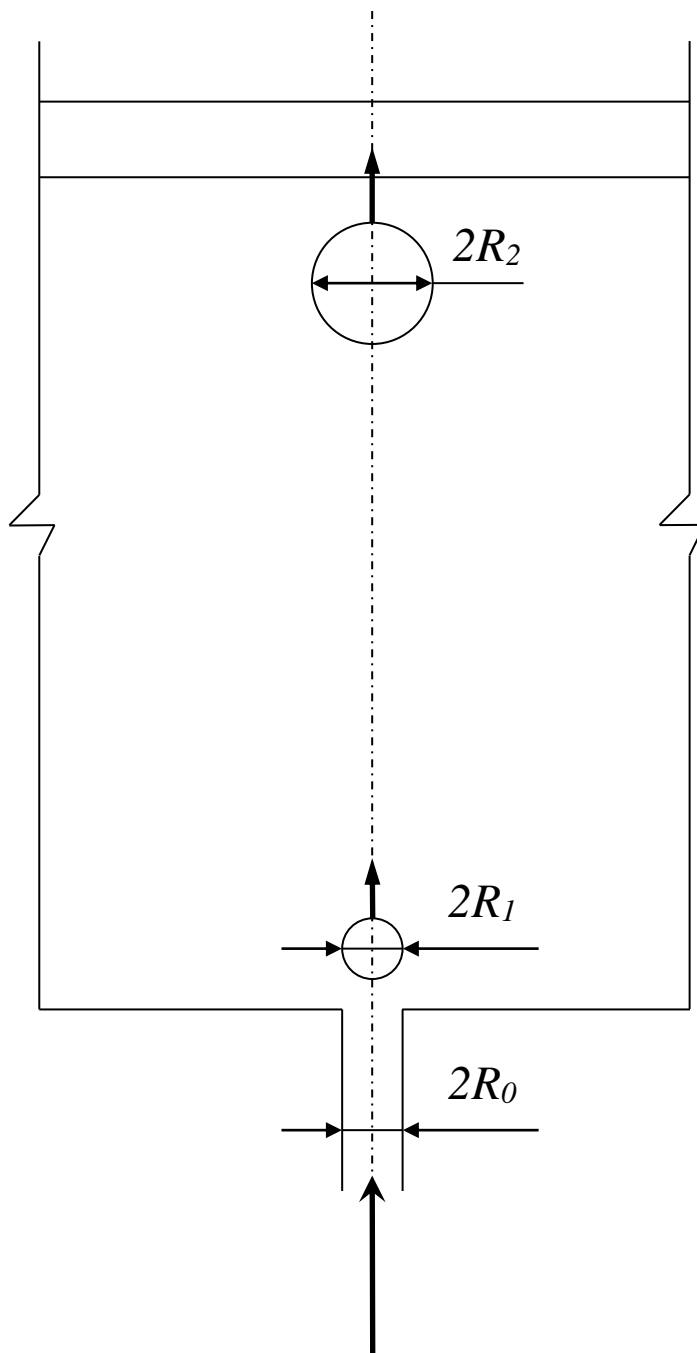


Рис. 6.2. Схема для расчета диаметра (радиуса) одиночного канала для подвода газа: 1 – шлак; 2 – металл

Запишем уравнение газового состояния для двух указанных положений пузырька [25]:

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}, \quad (6.10)$$

где V – объем газового пузыря, равный $\frac{4}{3} \pi R^3$.

После полученных преобразований получим

$$\frac{P_1 \cdot R_1^3}{T_1} = \frac{P_2 \cdot R_2^3}{T_2}. \quad (6.11)$$

Из соотношения (6.11) получим формулу для определения радиуса пузырька в момент его отрыва:

$$R_1 = R_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}} \quad (6.12)$$

Расчеты показывают, что для диаметра пузырька в момент прохождения через слой шлака $D_2 = 2R_2$, равного 10-11 мм, диаметр пузырька в момент отрыва $D_1 = 2R_1$ составляет 4,7-5,2 мм.

В процессе образования и роста газового пузырька на него действуют подъемная сила и конвективные токи, стремящиеся его оторвать от отверстия канала фурмы. Этому препятствуют силы поверхностного натяжения. С учетом сказанного можно записать [26]

$$\frac{4}{3} \pi R_1^3 \cdot g(\rho' - \rho'') = 2\pi R_0 \cdot \sigma, \quad (6.13)$$

где R_1 – радиус пузыря в момент отрыва, м; R_0 – радиус отверстия подводящего канала фурмы, м; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; ρ' , ρ'' – плотность металла и пузырька аргона, кг/м³.

Из уравнения (0.13) следует, что

$$d_0 = \frac{4 \cdot R_1^3 \cdot g(\rho' - \rho'')}{3\sigma} \quad (6.14)$$

Для σ , равного 0,93 Н/м [27] и диаметра пузырька в момент отрыва, равного 4,7-5,2 мм, получаем величину диаметра подводящего канала фурмы в пределах 1,3-1,7 мм.

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что при диаметре подводящего канала фурмы, равном 1,7 мм, пузырьки вводимого газа гарантированно будут проходить через слой покровного шлака.

Будем формулировать математическую модель гидродинамических процессов и процессов тепломассопереноса в промежуточном ковше ориентируясь на следующие физические параметры и допущения:

- расплав поступает через защитную трубу радиусом $R=0,023$ м со скоростью $V_m < 5$ м/сек;
- скорости и расходы в разливочных стаканах определяются режимом работы кристаллизаторов сечением 1850 250мм и вытягивании слябов со скоростью 0,8м/мин [28];
- полагаем, что промковш предварительно наполнен расплавом, физические свойства которого соответствует свойствам разливаемого металла, а величина скорости потоков равна 0.
- минимальный уровень металла в центральной части ковша (или в приемной секции) равен 0,4м [28];

- граница поверхности расплава плоская, расположена на уровне $h = 0.3 \div 0.6$ м относительно дна центральной части ковша;
- температура разливаемого металла $T_m = 1820$ К;
- будем рассматривать расплав как ньютоновскую жидкость с заданными постоянными физическими свойствами жидкой стали (плотность $\rho_m = 7200$ кг/м³, коэффициент теплопроводности $\lambda_m = 26.5$ Вт/(м·К), теплоемкость $c_m = 838$ Дж/(кг·К), кинематическая вязкость $\nu = 5 \cdot 10^{-7}$ м²/сек);
- футеровка стенок выполнена из основных (CaO, MgO) или нейтральных (Al₂O₃) огнеупоров (таблица 6.1);
- для продувки применяется аргон ($\rho_m = 1.7837$ кг/м³ при нормальных условиях)

На основе описанной физической характеристики протекающих в промежуточном ковше процессов сформулируем модельную задачу исследований.

6.3. Математическая модель гидродинамических, тепло- и массообменных процессов в промковше

Рассмотрим модельную задачу. Будем представлять течение в промежуточном ковше (рис. 6.1) плоским. Скорость металла, поступающего в промковш, выберем таким образом, чтобы соблюсти расход. При этом принимаем эффективное сечение трубы и разливочных стаканов с учетом осредненного поперечного размера промковша b (~1 м). Уровень металла считаем стационарным. Также для вдуваемого газа предполагаем отсутствие процесса растворения в расплаве и пузырьковое течение по всей глубине ванны.

В настоящее время для описания турбулентных течений используют методы, базирующиеся на решении уравнений Навье – Стокса. Несмотря на всё разнообразие известные подходы для расчета турбулентности можно условно разделить на два класса.

К первому относятся подходы к моделированию турбулентности, базирующиеся на первых принципах аэрогидродинамики [29-32]: прямое численное моделирование (ПЧМ / DNS – Direct Numerical Simulation в англоязычной литературе), метод моделирования крупных вихрей (МКВ / LES – Large Eddy Simulation), метод моделирования отсоединенных вихрей (МОВ / DES – Detached-Eddy Simulation) [30] предполагают решение полных нестационарных уравнений Навье – Стокса и уравнения неразрывности. Трудности заключаются в ограниченности компьютерных ресурсов и вычислительной трудоемкости этих подходов. Характерной особенностью течений, исследованных до настоящего времени в рамках ПЧМ, является их пространственная ограниченность (течения в канале, пограничный слой) и сравнительно небольшие числа Рейнольдса. Согласно достаточно оптимистическому прогно-

зу в [32] использование ПЧМ для решения крупномасштабных прикладных задач станет возможным не ранее 2080 г.

Ко второму классу относятся полуэмпирические модели турбулентности, базирующиеся на решении осредненных уравнений Рейнольдса (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS) [33].

К простейшим из них (алгебраическим) относятся модели турбулентности задействующие для замыкания уравнений гидродинамики статистические моменты случайных полей [34] первого порядка [35-38], которые используют сформулированный Буссинеском градиентный подход к описанию процессов турбулентного переноса. В таких моделях, согласно формулировке [38], механизм турбулентного переноса количества движения полностью определяется заданием местных значений производных от осредненных скоростей по поперечной к направлению потока координате и физических свойств жидкости. Явно не содержат дифференциальных уравнений переноса.

Замыкание системы уравнений гидродинамики производится при помощи введения эффективной вязкости

$$\nu_{эфф} = \nu + \nu_T D, \quad (6.15)$$

где D – демпфирующий множитель Ван-Дрифта (для учета вязкого подслоя),

$$D = \left[1 - e^{\left(-\frac{y\kappa^*}{\nu A} \right)^2} \right], \quad A = 26. \quad (6.16)$$

Алгебраические модели опираются на двухслойную структуру пограничного слоя. Формула турбулентной вязкости для внешней области пограничного слоя [37] (постоянная вязкость):

$$\nu_{T0} = k\nu\delta^* \quad (6.17)$$

где $k = 0.0168$ – эмпирическая константа Клаузера; $\delta^* = \int_0^\infty \left(1 - \frac{u(y)}{U_e} \right) dy$ – толщина вытеснения пограничного слоя, U_e – скорость на внешней границе пограничного слоя.

Формула Прандтля [35] для турбулентной вязкости во внутренней области (при условии $\ell = \kappa y$):

$$\nu_{Ti} = \kappa^2 y^2 \frac{\partial u}{\partial y} \quad (6.18)$$

где $\kappa = 0.41$ – эмпирическая постоянная Кармана.

Для учета влияния сжимаемости, градиента давления, массообмена через стенку, шероховатости и кривизны поверхности, малых чисел Рейнольдса и т.п. необходимо введение дополнительных поправок.

Соотношениями (6.15-6.18) составляют полномасштабную модель турбулентной вязкости, широко используемую (в форме многообразных модификаций) в практических расчетах до настоящего времени [29, 31, 39].

В основе полуэмпирической теории Прандтля (и ее многочисленных модификаций) лежит гипотеза локальности механизма турбулентного переноса, как сказано выше [38]. Эта гипотеза оказалась эффективной для описания равновесных течений [29], для существенно неравновесных течений, в которых структура осредненного течения не соответствует внутренней структуре турбулентности, применение гипотезы локальности оказывается менее оправданным. Алгебраические модели турбулентности очень неуниверсальны, т.к. основаны на закономерностях, характерных для тех или иных «канонических» течений (пограничный слой, струя, слой смешения) в которых средняя скорость имеет (как правило) только одну компоненту [34], используют нелокальные характеристики, такие как толщина погранслоя, трение на стенке и т.п.

Более сложные полуэмпирические модели – дифференциальные, базируются на статистических моментах случайных полей второго порядка [34], в основе содержат уравнения, в частности, уравнения для кинетической энергии турбулентности или для рейнольдсовых напряжений, для замыкания которых необходимо выразить неизвестные члены через набор определяющих параметров так, чтобы число уравнений соответствовало числу этих параметров. Возможности для обоснованного установления таких связей многообразны, что привело к разработке большого числа моделей подобного рода.

Модели с одним уравнением для турбулентной вязкости: Спаларта-Аллмареса (SA) [40], Гуляева-Козлова-Секундова (v_t -92) [41]; для турбулентного числа рейнольдса – Болдуина-Барса [42].

В соответствии с гипотезой Колмогорова-Прандтля [43, 44] скорость диссипации энергии турбулентности определяется каскадным процессом переноса энергии последовательно от «больших вихрей» к «меньшим». Этот каскадный процесс, как предполагается, зависит лишь от величин ρ , L_T и k и не зависит от вязкости. Требуют дополнительных алгебраических соотношений для замыкания.

Диссипация турбулентной энергии (формула Колмогорова) [43]:

$$\varepsilon = C_d \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\rho L_T} \quad (6.19)$$

где C_d – эмпирическая постоянная, L_T – линейный интегральный масштаб турбулентности. В наиболее простых моделях для определения этого масштаба используется допущение об адекватности пути смешения, определяемого по формулам, подобным формуле Прандтля (6.18).

Турбулентная вязкость (Колмогоров-Прандтль)

$$\nu_T = C_D C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (6.20)$$

Эти модели также не универсальны как и алгебраические модели. Наиболее успешными из них являются модели, решающие уравнение относительно турбулентной вязкости SA, v_t -92.

В более сложных моделях вместо алгебраических выражений для масштаба турбулентности используются дифференциальные уравнения. Модели с двумя дифференциальными уравнениями типа k-ε [33], типа k-ω [33, 45], Ментера (SST). Наибольшее распространение получили двухпараметрические модели, в которых вместо уравнения для масштаба турбулентности используется уравнение для скорости диссипации энергии турбулентности ε. Семейство этих моделей получило наименование k-ε моделей турбулентности.

Создание универсальной полуэмпирической модели турбулентности предназначенной для замыкания уравнений Рейнольдса (то есть, модели, пригодной для расчета всех или, по крайней мере, большинства гидродинамических течений) в настоящее время представляется также неосуществимыми. Эта оценка базируется на многолетнем опыте применения полуэмпирических моделей турбулентности и на отсутствии реального прогресса в области построения таких моделей в течение последних 20 лет [46].

Причина этого состоит в том [30], что наряду с “универсальной” мелкомасштабной турбулентностью, существенное влияние на параметры турбулентных потоков оказывают относительно устойчивые крупномасштабные (с размерами порядка макро-масштаба течения), принципиально трехмерные нестационарные турбулентные структуры (“вихри”). Характеристики этих структур зависят от конкретной геометрии рассматриваемого течения и граничных условий и, следовательно, не могут быть описаны в рамках полуэмпирических моделей.

В соответствии с текущим состоянием проблемы моделирования турбулентности и ограничений, накладываемых физической моделью исследуемых процессов рационально сделать выбор на k-ε модели, которая достаточно хорошо отработана, имеет умеренную сложность и осуществима в рамках располагаемых возможностей вычислительной техники.

Для математического описания тепловой конвекции расплава в полости проковша (рис. 6.3, область Ω) запишем систему уравнений в приближении Буссинеска. В векторном виде в физических переменных имеем следующую систему:

Уравнение движения с осреднением по Рейнольдсу

$$\begin{aligned} \varphi \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \varphi \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} - \nabla \cdot \left[\varphi \left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \cdot \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right] \right] = \\ = \varphi \rho \vec{g} (1 - \beta (T - T_0)) - \nabla p \end{aligned} \quad , \quad (6.21)$$

где ρ – плотность расплава, кг/м³; $\varphi = 1 - \varphi_2$ – объемная доля жидкой фазы, м³/м³; φ_2 – объемная доля «пузырьковой» газовой фазы, м³/м³; β – коэффициент объемного теплового расширения расплава в окрестности температуры заливки $T_0 = 1820\text{K}$, 1/K; \vec{u} – вектор скорости течения расплава, м/с; t – текущее время, с; \vec{g} – ускорение свободного падения, м/с²; p – давление, Н/м²; η

– коэффициент динамической вязкости, Па·сек; $\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ – коэффициент турбулентной вязкости, кг/(м·сек).

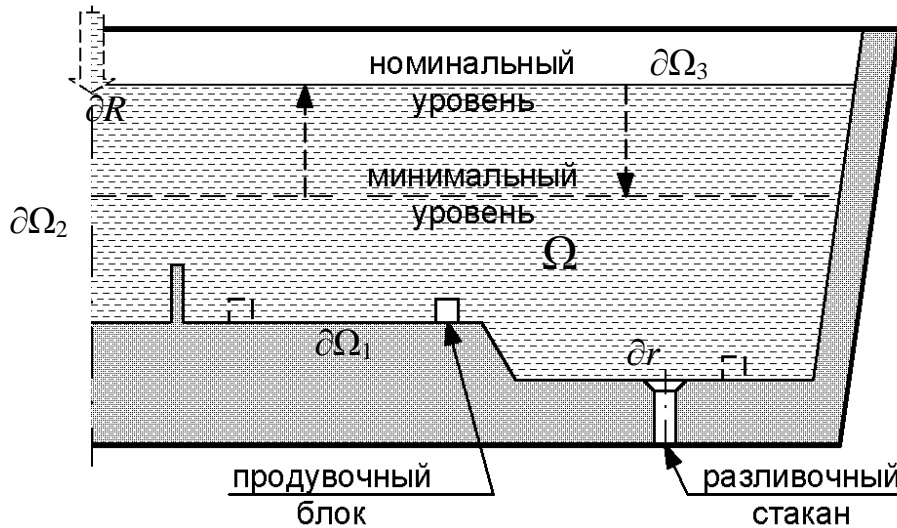


Рис. 6.3. Область исследования Ω – ванна промежуточного ковша

Уравнение переноса объемной доли газовой фазы

$$\frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + (\vec{u}_2 \cdot \nabla) \varphi_2 - \nabla \cdot (D_{эфф} \nabla \varphi_2) = R, \quad (6.22)$$

где $D_{эфф} = \frac{\eta_T}{\rho}$ – коэффициент эффективной турбулентной «диффузии» пузырьков к металлу, определяющий их скорость дрейфа, м²/с; \vec{u}_2 – скорость движения газовой фазы (ее вертикальная составляющая для данного уравнения $v_2 = v + v_b$), м; v_b – относительная скорость всплытия пузырьков в жидкой среде [47-49], $R = \frac{q}{V_0} \frac{T}{273}$ – источник газовой фазы [50], действующий в области продувочного блока [51], м³/(м³·сек), где q – расход газа через продувочный блок, м³/сек; V_0 – характерный объем зоны формирования барботажного режима, м³.

Уравнение неразрывности для низких концентраций [51] газовой фазы

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0. \quad (6.23)$$

Уравнения турбулентной кинетической энергии

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla k - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = \frac{1}{2} \eta_T (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)^2 - \rho_1 \varepsilon + P_b; \quad (6.24)$$

и скорости её диссипации

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla \varepsilon - \nabla \cdot \left(\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) =$$

$$= \frac{1}{2} C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \left(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T \right)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} P_b \quad (6.25)$$

где $C_\mu=0.09$, $C_{\varepsilon 1}=1.44$, $C_{\varepsilon 2}=1.92$, $\sigma_k=1$, $\sigma_\varepsilon=1.3$ – стандартные значения эмпирических постоянных k - ε модели [33, 52], $P_b = -C_b \varphi_2 \nabla p \cdot v_b$ – слагаемое, учитывающее турбулентность индуцированную пузырьками [53], C_b – эмпирическая постоянная ($0 \leq C_b \leq 1$).

Уравнение переноса тепла

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} + C_p \rho (\vec{u} \cdot \nabla) T - \nabla (\lambda_{эфф} \nabla T) = Q, \quad (6.26)$$

где $\lambda_{эфф} = \lambda + \lambda_T$ – эффективный коэффициент теплопроводности расплава,

Вт/(м·К); $\lambda_T = \frac{C_p \eta_T}{Pr_T}$ – турбулентный коэффициент теплопроводности,

Вт/(м·К); C_p – теплоемкость расплава, Дж/(кг·К); Pr_T – турбулентное число

Прандтля [54, 55]; $Q = 2 \frac{\alpha_{cm}}{b} (T - T_{cp})$ – тепловой поток, учитывающий потери

тепла через боковые стенки, «параллельные» расчетной плоскости для соблюдения теплового баланса совокупного объема расплава, Вт/м³;

$\alpha_{cm} = \frac{1}{\sum \frac{h_{cl}}{\lambda_{cl}} + \frac{1}{\alpha_{cp}}}$, α_{cp} – коэффициент теплоотдачи через стенку, учитываю-

щий, что футеровка промковша многослойная и для каждого слоя характерен свой коэффициент теплопроводности [56] и коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности стенки воздуху соответственно, Вт/(м²·К); λ_{cl} и h_{cl} – коэффициент теплопроводности и толщина каждого слоя стенки соответственно, Вт/(м·К) и м; $T_{cp} = 303$ К – температура окружающей среды.

Для решения задачи в системе «промковш-расплав» уравнения (6.21-6.26) дополняются начальными и граничными условиями.

В начальный момент времени t_0 предполагается отсутствие потоков и газовой фазы, однородное распределение температуры расплава. Значение давления на всех открытых поверхностях в силу незначительного перепада по высоте в сравнении с ферростатическим давлением можно считать одинаковым и для удобства принять равным 0:

$$\vec{u}_{t_0, \Omega_1} = 0; \quad p_{t_0, \Omega} = \rho g (H - y); \quad \vec{u}_{t_0, \Omega_1} = 0; \quad T|_{t_0, \Omega} = T_0, \quad (6.27)$$

где H – уровень расплава в промежуточном ковше, м.

Для стенок промежуточного ковша $\partial \Omega_1$ из физических соображений действуют условия прилипания и непроницаемости и задан режим конвективного теплосъема окружающей средой:

$$\vec{u}|_{\partial\Omega_1} = \vec{0}; \quad \vec{n} \cdot (-D_{\text{эфф}} \nabla \varphi_z)|_{\partial\Omega_1} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda_{\text{эфф}} \nabla T)|_{\partial\Omega_1} = \alpha_{\text{см}} (T - T_{\text{ср}}), \quad (6.28)$$

где \vec{n} – внешняя нормаль к границе. Здесь и далее по тексту опущены граничные условия для k и ε в стандартной постановке k - ε модели.

На оси симметрии $\partial\Omega_2$ ставятся граничные условия скольжения (для скорости) и отсутствия потоков:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_2} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-D_{\text{эфф}} \nabla \varphi_z)|_{\partial\Omega_2} = 0; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda_{\text{эфф}} \nabla T)|_{\partial\Omega_2} = 0. \quad (6.29)$$

На свободной поверхности расплава $\partial\Omega_3$, в зависимости от вязкости шлака для скорости выбираются несколько вариантов граничных условий. В общем случае только нормальная компонента скорости будет равна 0, а поток газовой фазы равен количеству газовой фазы, достигающей единицы поверхности:

$$\vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial\Omega_3} = 0; \quad p|_{\partial\Omega_3} = 0, \quad \vec{n} \cdot (-D_{\text{эфф}} \nabla \varphi_z + \varphi_z \vec{u}_z)|_{\partial\Omega_3} = k\varphi_z, \quad (6.30)$$

теплоотдача через слой шлака, соответственно

$$\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial\Omega_3} = \alpha_{\text{шл}} (T - T_{\text{ср}}) + \varepsilon_{\text{шл}} \sigma (T_{\text{шл}}^4 - T_{\text{ср}}^4). \quad (6.31)$$

где $\alpha_{\text{шл}} = \frac{1}{\frac{h_{\text{шл}}}{\lambda_{\text{шл}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ср}}}}$ – коэффициент теплоотдачи через слой шлакового покро-

ва; $\lambda_{\text{шл}}$ и $h_{\text{шл}}$ – коэффициент теплопроводности и толщина шлакового покрова, соответственно; $\varepsilon_{\text{шл}}$ – степень черноты шлака; $\sigma_{\text{шл}}$ – постоянная Стефана-Больцмана; $T_{\text{шл}}$ – температура шлакового покрова, К. В случае наличия у промковша теплоизолирующей крышки данное граничное условие должно также учитывать её тепловое сопротивление и «переизлучение».

Условия втекания для ∂R и истечения расплава для ∂r выбираются согласно физической постановке задачи:

$$\begin{aligned} \vec{n} \cdot \vec{u}|_{\partial R} = -u_0; \quad p|_{\partial R} = 0; \quad \varphi_z|_{\partial R} = 0; \quad T|_{\partial R} = T_0; \\ \vec{\tau} \cdot \vec{u}|_{\partial r} = 0; \quad p|_{\partial r} = \rho g H; \quad \vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T)|_{\partial r} = 0, \end{aligned} \quad (6.32)$$

где $\vec{\tau}$ – единичный вектор касательной к границе; ∂R – граница защитной трубы; ∂r – границы разливочных стаканов.

Таким образом, сформулирована математическая модель гидродинамических, тепло- и массообменных процессов, имеющих место в промежуточном ковше. Данная модель позволит оценивать тепловые режимы работы промежуточного ковша с различной конфигурацией перегородок и вставок, организующих потоки расплава, а также конфигурацией и расположением продувочного блока при обработке расплава аргоном.

Информация о кинетической энергии и энергии турбулентного движения в расплаве дает возможность определять режимы воздействия на расплав, обеспечивающие максимальную эффективность его взаимодействия со

шлаковым покрытием с целью удаления неметаллических включений и предохранения затягивания шлака в расплав, а также предотвращения возникновения застойных зон, имеющих негативное влияние на тепловую обстановку и тепловую однородность расплава в промежуточном ковше, особенно в переходных режимах [28].

С целью увеличения достоверности данную модель можно дополнить уравнением для расчета плотности газовой фазы на основе уравнения состояния идеального газа, что позволит делать более точные оценки скорости всплытия пузырьков и их влияния на гидродинамические параметры течения.

6.4. Пример расчета задачи средствами пакета

COMSOL Multiphysics (ранее FEMLAB) – это мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов большинства научных и инженерных задач основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных (PDE) методом конечных элементов (FEM). Данный программный пакет может работать со стандартными моделями, использующими одно или несколько дифференциальных уравнений (прикладной режим), а также позволяет комбинировать любые стандартные модели для расчета связанных между собой физических явлений (мультифизический режим). Кроме стандартных моделей возможно построение собственных моделей для подавляющего большинства дифференциальных уравнений в частных производных, известных в математической физике. Пакет всесторонне активно развивается разработчиками (на момент написания данного материала последняя версия 4.x), в том числе и в направлении увеличения числа доступных готовых моделей, с целью охвата как можно большего количества хорошо известных и широко распространенных физических явлений. Для прикладного применения во многих случаях данная среда численного моделирования имеет преимущество, так как не требует глубокого знания математической физики и метода конечных элементов. Это возможно благодаря встроенным физическим режимам, где коэффициенты PDE задаются в виде понятных физических свойств и условий, таких как: теплопроводность, теплоемкость, коэффициент теплоотдачи, объемная мощность и т.п. в зависимости от выбранного физического раздела. Преобразование этих параметров в коэффициенты математических уравнений происходит автоматически. Взаимодействие с программой возможно стандартным способом – через графический интерфейс пользователя (GUI).

В пакете существует три математических способа (формы) описания систем дифференциальных уравнений в частных производных:

- *коэффициентная форма (Coefficient)*, предназначенная для линейных и близких к линейным моделей;
- *общая форма (General)*, для нелинейных моделей;

- *слабая форма (Weak)*, для моделей с PDE на границах, ребрах или для моделей использующих условия со смешанными и производными по времени.

Используя эти способы, можно изменять типы анализа, включая:

- стационарный и переходный анализ;
- линейный и нелинейный анализ;
- модальный анализ и анализ собственных частот.

Для решения PDE, COMSOL Multiphysics использует метод конечных элементов. Программное обеспечение включает конечноэлементный анализ вместе с генерацией сеток, учитывающей геометрическую конфигурацию тел, и контролем ошибок с использованием разнообразных численных решателей. Так как многие физические законы выражаются в форме уравнений в частных производных, становится возможным моделировать широкий спектр научных и инженерных явлений из многих областей физики таких как: акустика, химические реакции, диффузия, электромагнетизм, гидродинамика, фильтрация, тепломассоперенос, оптика, квантовая механика, полупроводниковые устройства, сопломат и многих других.

Кроме вышеперечисленного, программа позволяет с помощью переменных связи (**coupling variables**) соединять модели в разных геометриях и связывать между собой модели разных размерностей.

Для типичной задачи моделирования физических процессов требуется перечисленная ниже последовательность действий. Рассмотрим ее на примере описанной выше модельной задачи продувки ванны промежуточного ковша МНЛЗ инертным газом.

1. Выбираем размерность модели, определяем физический раздел в **Model Navigator [Навигаторе моделей]** (каждому разделу соответствует определенное дифференциальное уравнение) и определяем стационарный или нестационарный анализ процессов (рис. 6.4).

Для решения данной задачи можно использовать комбинацию прикладного режима k-ε модели турбулентности для Навье-Стокса (chns) из Химического модуля и конвекции и диффузии для уравнения массопереноса (chcd).

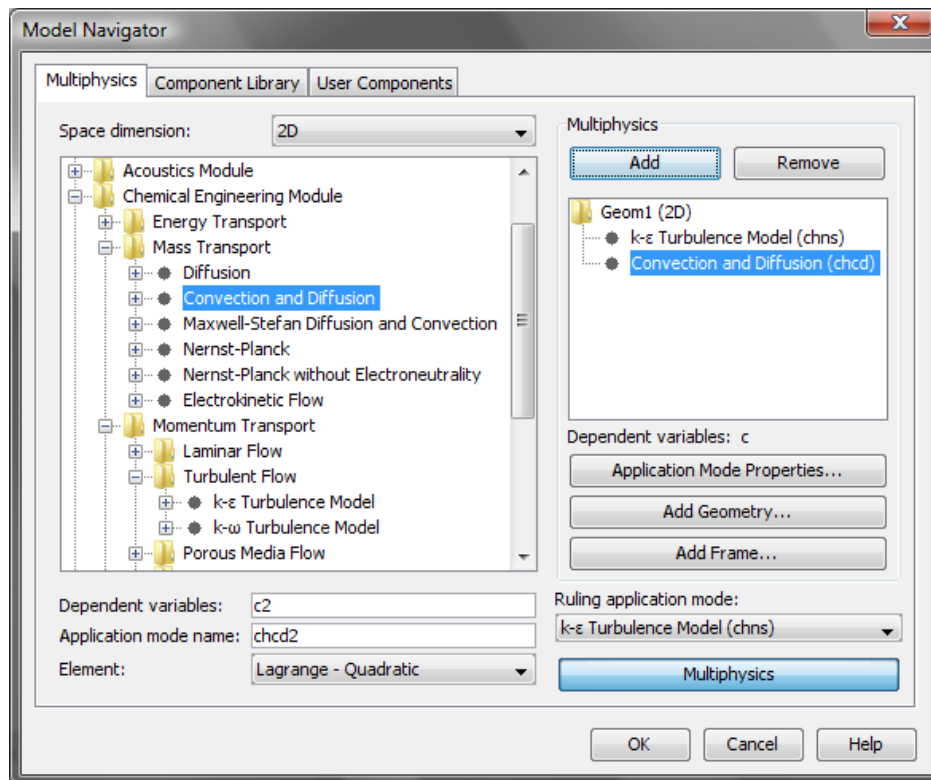


Рис. 6.4. Выбор прикладных режимов и их комбинирование

2. Определяем рабочую область и задаем геометрию. Пакет обладает встроенным редактором геометрии (рис. 6.5), поддерживающим векторное твердотельное моделирование, что позволяет задавать геометрию непосредственно.

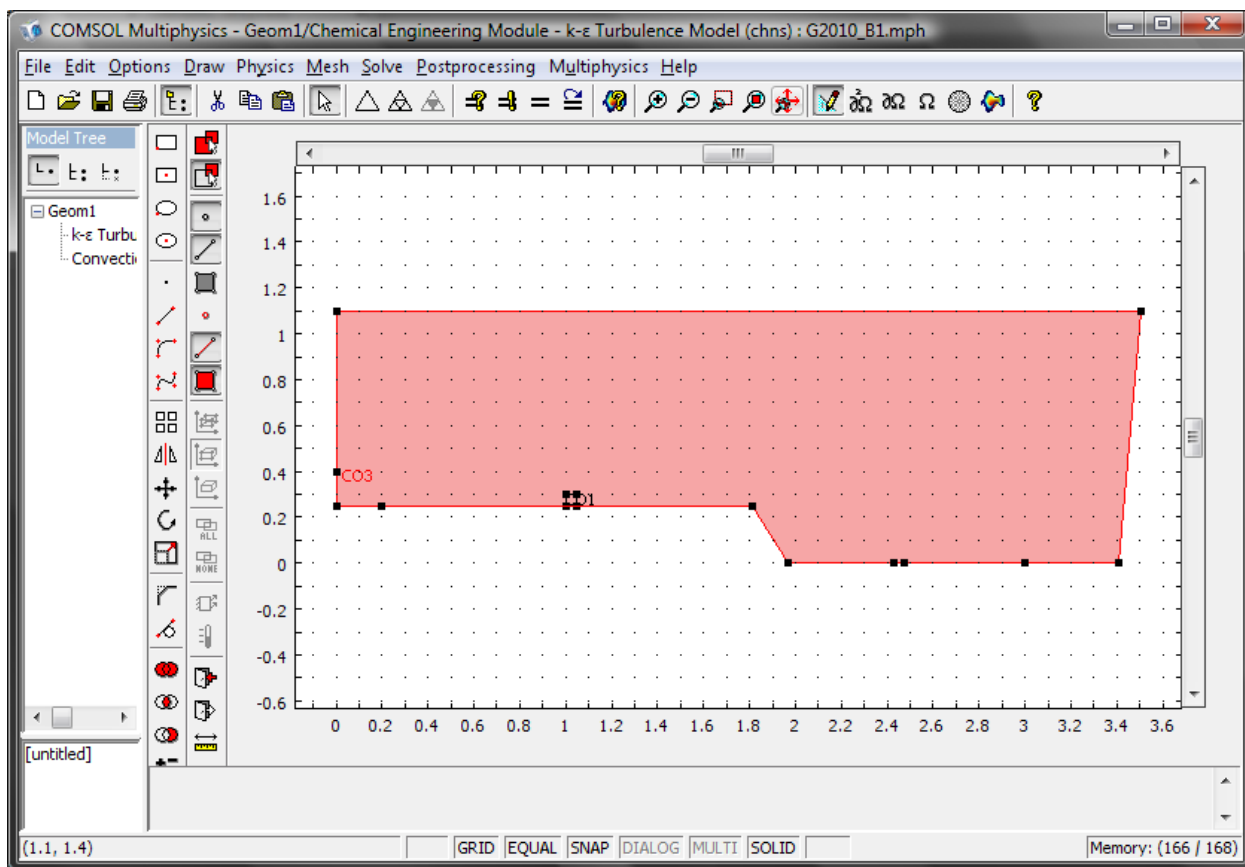


Рис. 6.5. Задание геометрии расчетной области в интегрированном графическом редакторе

3. Задаём исходные данные, зависимости переменных от координат и времени и т.п. в виде разнообразных констант, выражений и переменных.

В пакете Comsol (Femlab) существует мощный инструментарий для работы с константами и функциями. Рассмотрим некоторые из них.

Constants [Константы] рекомендуется все применяемые в системе константы вынести в эту таблицу (рис. 6.6), а во всех формулах задавать только буквенное обозначение. Например, задать температуру окружающего воздуха $T_{00}=303\text{K}$, а во всех граничных условиях вместо цифры задавать T_{00} . Тогда в случае необходимости можно будет поменять одну цифру, а не менять по всем граничным условиям температуру окружающего воздуха. Так же список всех часто употребляемых констант можно сохранить в отдельный файл и переносить из модели в модель. В последних версиях программы появилась возможность – к каждой константе написать **Description [Примечание]**, при работе нескольких человек с одной моделью не стоит игнорировать эту графу.

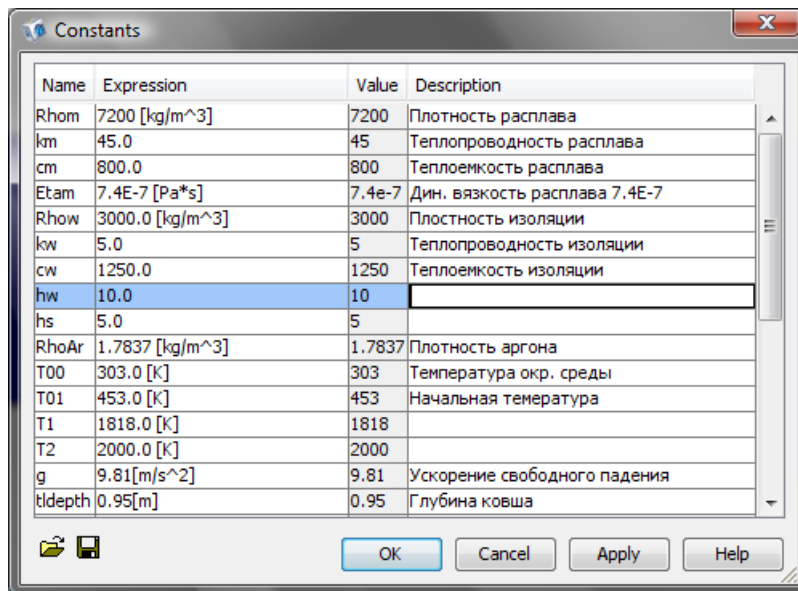


Рис. 6.6. Задание констант.

- **Expression [Выражения]** содержит **Scalar expression [Скалярные выражения]**, **Subdomain**, **Boundary**, **Edge** (только в трехмерном режиме) и **Point expression**. Можно задать зависимость теплофизического параметра от времени **t**; координат **x**, **y**, **z**; от безразмерной координаты **s** (изменяется от **0** до **1** по длине каждой границы) или от любых других вычисляемых параметров. Например **Min=Qin*Rhom** (рис. 6.7). У различных элементов системы очень часто одни и те же параметры определяются по разным законам. Есть возможность задать одно имя у переменной, например **alfa**. И открыв **Boundary expression [Граничные выражения]** задать для разных границ, различные формулы вычисления **alfa**. Тогда для всех границ можно будет задать коэффициент **alfa**, а программа сама подставит для каждой границы соответствующую формулу.

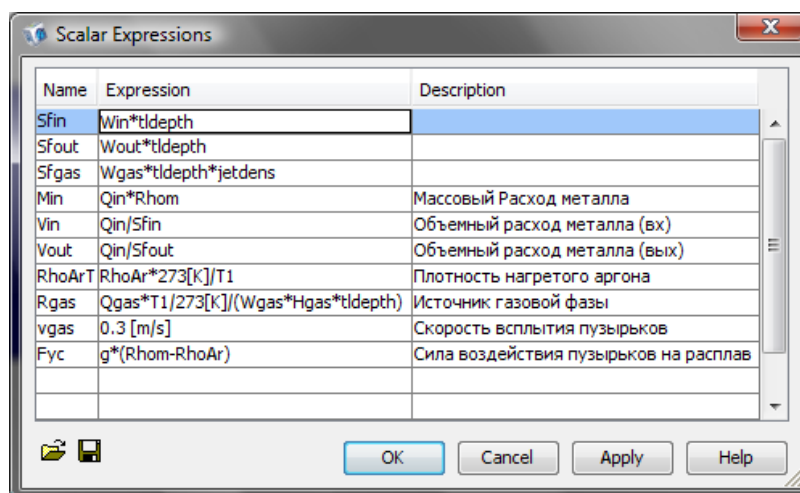


Рис. 6.7. Задание вычисляемых выражений

- **Coupling Variables [Переменные связи]** с помощью этих пунктов меню можно задавать очень сложные зависимости между частями системы. Например связать граничные условия с интегралом по объему.
- **Functions [Функция]** можно задать свою функцию, причем не только используя математические выражения. Если выбрать **Interpolation function**, то можно задать массив параметров и массив значений функций, и по ним построить интерполяционную функцию. Можно задать метод интерполяции, есть возможность импортировать данные из внешнего файла.
- **Coordinate systems [Системы координат]** можно создать произвольную систему координат, с любым расположением осей относительно друг друга.
- **Material/Coefficients Library [Библиотека материалов]** в ней есть возможность задать любые физические свойства веществ, и даже их зависимость от параметров (температуры и давления).
- **Visualization/Selection settings [Установки визуализации]** позволяют управлять отображением объектов, освещением и выделением.
- **Suppress [Скрытие]** В сложных объектах для наглядности иногда нужно сделать невидимым какой либо элемент системы. Например, если рассматривается процесс конвективного охлаждения, нагляднее, если воздух будет не виден, а будет видна только охлаждаемая поверхность с распределением температуры.

В COMSOL есть много возможностей гибкой настройки системы под каждую конкретную задачу. Можно изменять систему Дифференциальных Уравнений в Частных Производных (PDE). Для этого служит группа команд **Physics>Equation system**. Эти команды позволяют в широких пределах изменять исходные PDE, способы задания начальных и граничных условий, а также параметры конечных элементов.

Задание Физических свойств в областях, Граничных Условий (и условий на ребрах или точках) происходит в соответствующих режимах, которые автоматически включаются при открытии окон ввода свойств этих элементов.

4. Указываем граничные условия через **Physics> Boundary Settings** (рис. 6.8).

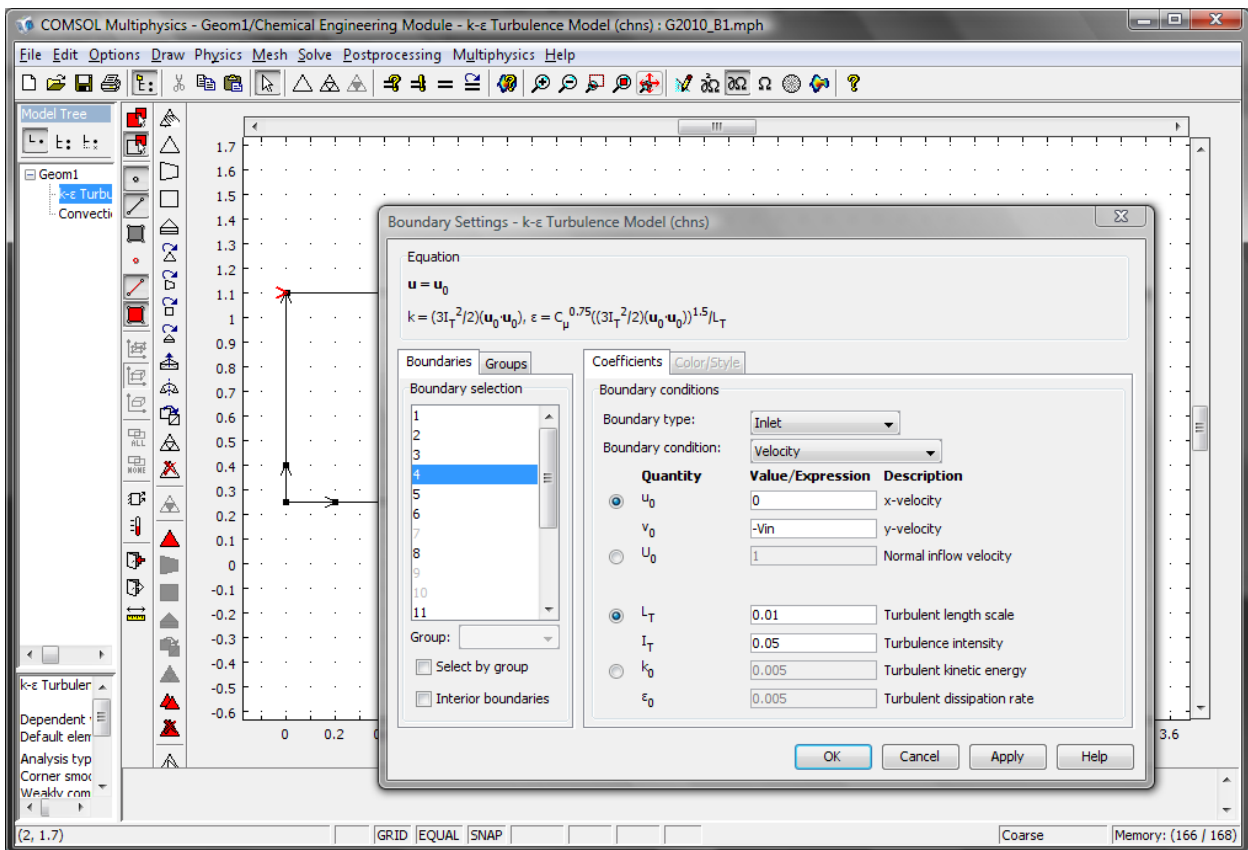


Рис. 6.8. Задание граничных условий

5. Указываем теплофизические свойства и начальные условия.

Чтобы самостоятельно добавить значения необходимых коэффициентов открываем окно **Physics>Equation system>Subdomain settings**, здесь можно для каждой подобласти (**Subdomain**) задать в прямом виде значение любого коэффициента PDE или же изменить формулу вычисления коэффициентов. У каждой области, для которой мы примем изменения, появится значок замка. Он будет виден и из окна **Physics>Subdomain settings** (рис. 6.9). Приоритет всех значений у окна **Physics>Equation system>Subdomain settings**, поэтому надо проверять какие коэффициенты уже здесь указаны, а лишь потом задавать материальные свойства в **Physics>Subdomain settings**. Сбросить все изменения системы уравнений можно кнопкой **Reset Equation**.

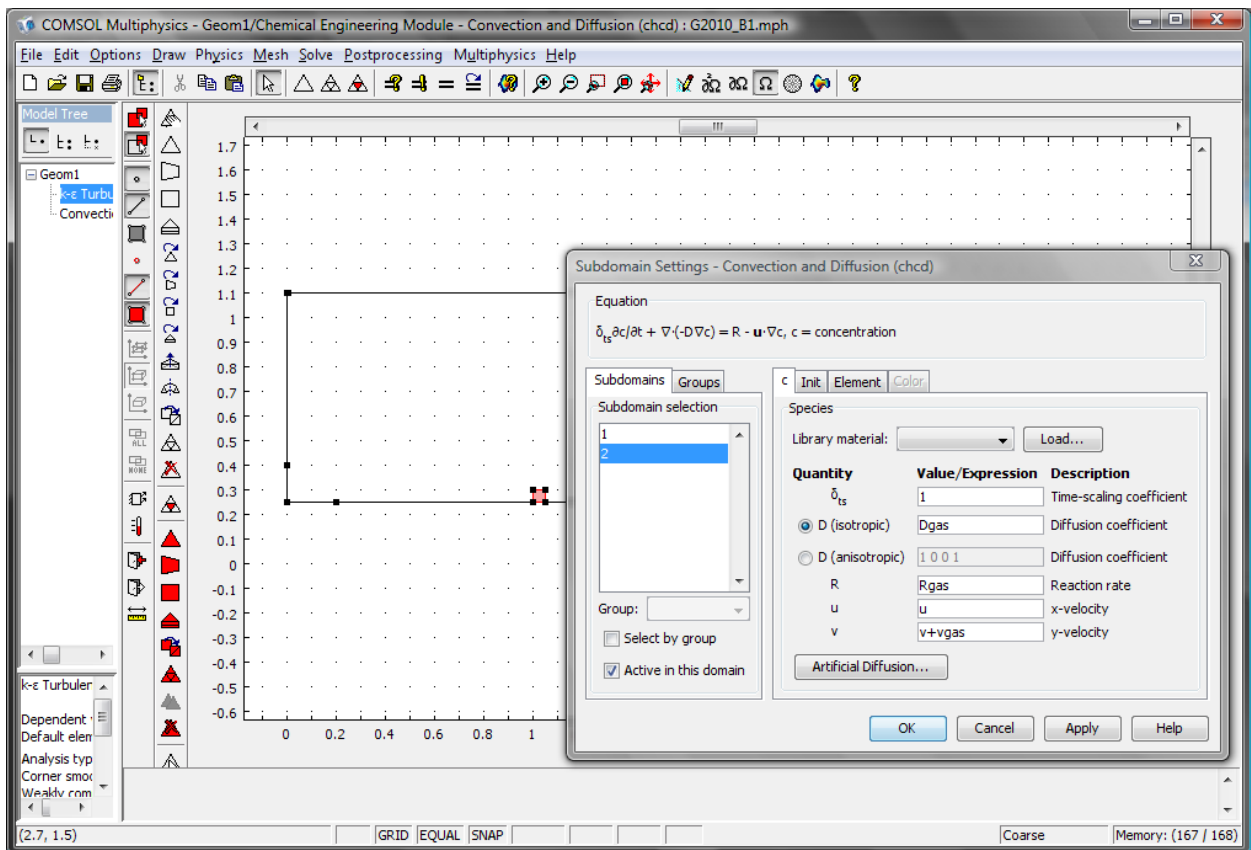


Рис. 6.9. Задание коэффициентов физических свойств подобластей для прикладного режима

6. Задаём параметры и строим сетку.

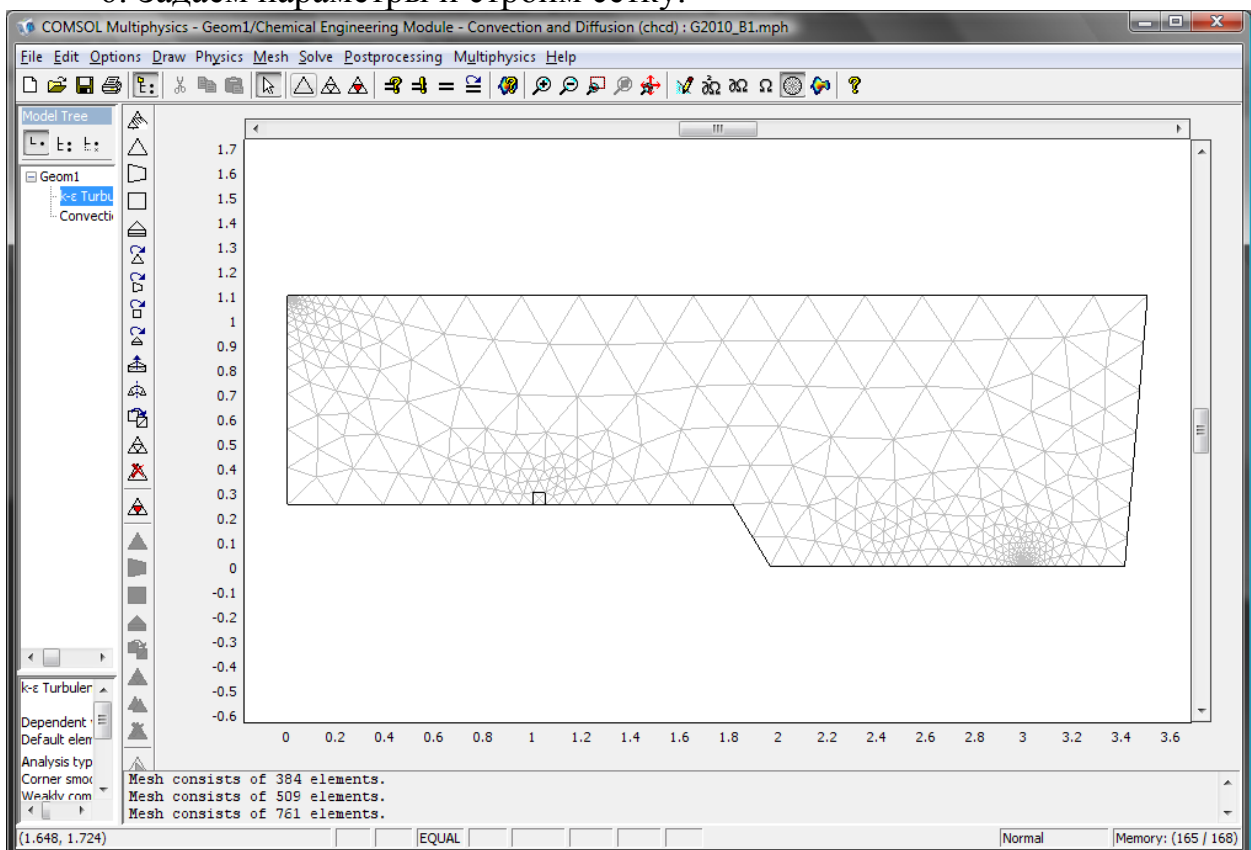


Рис. 6.10. Генерация сетки

7. Определяем параметры решающего устройства и запускаем расчет.

Выбор решающего устройства и его параметров очень важен, так как в основном от него зависит достоверность вычислений. Неправильная настройка может привести к грубым ошибкам решения, которые очень трудно выявить. Также очень важно правильно оптимизировать решение, так как, к примеру, некоторые нелинейные нестационарные модели могут рассчитываться многие часы даже на очень мощном компьютере.

Кнопка **Solve** или пункт меню **Solve>Solve problem** запускает решающее устройство с текущими настройками. Кнопка **Restart** или пункт меню **Solve>Restart** перезапускает решающее устройство используя текущие значения (поле температур или скоростей) как начальные. Если мы рассматриваем стационарную задачу, то нажатие этой кнопки не должно менять решение. Колебания значений в этом случае говорят о нестабильности решения. Эту команду целесообразно применять для сложных расчетов, когда можно получить приближенный вариант решения на грубой сетке и для линейного или стационарного решателя, а потом сделав более мелкую сетку и при необходимости изменив решатель на нелинейный или переходный пересчитать задачу. Зачастую это позволяет получить решение быстрее, чем сразу запустив сложный расчет.

Для изменения параметров нажмем **Solve>Solver parameters...** или соответствующую кнопку (рис. 6.11).

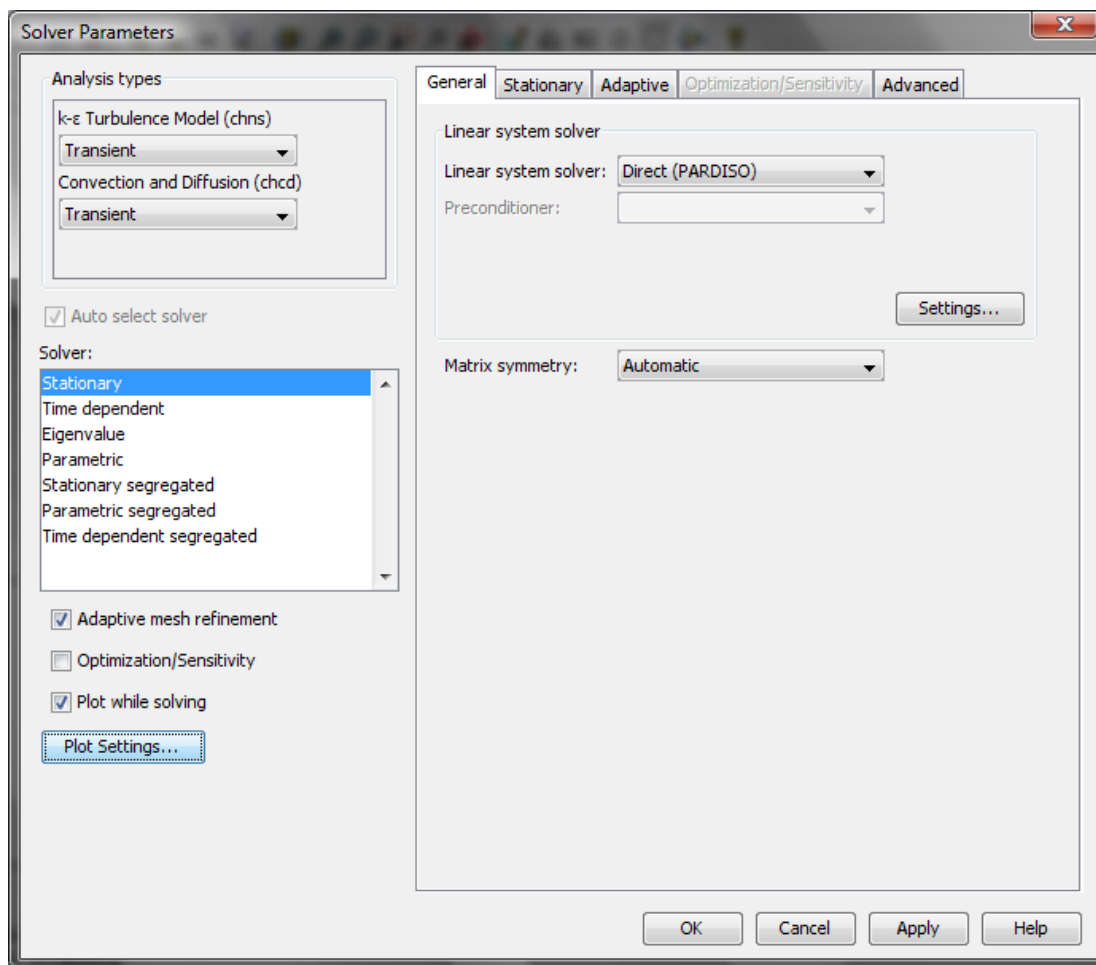


Рис. 6.11. Выбор параметров решателя

Если выбрано **Auto select solver**, значит программа в зависимости от прикладного режима подобрала наиболее подходящее устройство, для несложных вычислений чаще всего менять его не надо.

Выбирая решающее устройство, надо в первую очередь определиться стационарный или переходный процесс мы изучаем. Если процесс нестационарный, то в подавляющем большинстве случаев подходит решатель **Time Dependent**.

Для очень редких задач, связанных с нахождением собственных чисел дифференциальных уравнений, например волнового уравнения теплопроводности, надо выбирать решатель **Eigenvalue**.

Если проблема стационарна, то надо определить линейна она или нелинейна. Если есть сомнения в линейности системы, то рекомендуется сразу устанавливать нелинейный решатель: если для линейной модели установить нелинейный решатель, то ответ будет корректен, но на вычисления затратится больше времени; а если для нелинейной задачи установить линейный решатель, то наверняка будут грубые ошибки.

Если в заданных коэффициентах присутствуют переменные (например, теплоемкость или теплопроводность) для которых задана зависимость от искомого поля (температуры) или от других связанных с искомым полем пере-

менных, то задача нелинейная. Все задачи в которых учитывается теплообмен излучением, то есть где C или C_{trans} (константа Стефана-Больцмана) не равна нулю – нелинейные. Модели, которые задают в прикладном режиме **Incompressible Navier-Stokes** практически всегда нелинейные.

Для линейных и нелинейных стационарных задач можно выбрать параметрический решатель, в котором надо указать параметры, для которых задаётся несколько значений. Например, задать ряд разных теплопроводностей или мощностей для какого-либо объекта, а потом сравнить распределение температур при всех значениях параметра. После выбора решателя в поле **Solver**, задаем основные свойства.

Для **Time Dependent** на вкладке **General** это **Time stepping [шаги по времени]** в поле *Times* в формате **0:10:60** задаются временные слои. Здесь, от **0** до **60** секунд с промежутком **10** секунд. Единица измерения времени секунда, она устанавливается в **Physics>Subdomain Settings** в поле **Time scaling coefficient**. Если вместо **1** задать **1/60**, то единица измерения времени будет равна 1 минуте. Поля *tolerance* определяют ошибку на каждом шаге итерации. Галочка **Allow complex number** позволяет применять в расчетах комплексные числа это нужно в случаях, если мы задали коэффициенты PDE в комплексном виде. Вкладка **Time Stepping** определяет шаги по времени. Пункт **Times to store in output** определяет какие временные шаги будут выводиться для постобработки вычислений. По умолчанию стоит **Specified Times**, то есть времена определённые на вкладке **General**. Для того чтобы получить значения всех шагов решающего устройства надо выбрать **Time steps from solver**. Вообще, решающее устройство выбирает шаги произвольно, в зависимости от динамики системы, то есть игнорирует заданные значения **Times** на вкладке **General**. Чтобы решающее устройство учитывало этот список (например, если внешние воздействия импульсные и решатель может «проскочить мимо них») надо установить **Time steps taken by solver** в значение **Strict** (тогда решатель будет использовать только эти шаги) или **Intermediate** (решатель использует и свободные шаги и перечисленные на вкладке **General**) вместо стоящего по умолчанию **Free**. Если надо принудительно задать шаг по времени нужного размера, то это делается в поле **Manual Tuning of step size**.

Для **Eigenvalue** необходимо задать количество собственных чисел уравнения в поле **Desired number of eigenvalues** и около каких значений искать собственные числа в поле **Search for eigenvalues around**.

Для параметрических решателей надо установить имя параметра, который будет изменяться в поле **Name of parameter** и значения которые он будет принимать в поле **List of parameter values**. Значения можно перечислить через пробел, задать в виде **0:10:100** или задать как функцию **linspace(0, 100, 11)**, то есть 11 значений равномерно расположенных от 0 до 100.

Для нелинейных решателей появляется вкладка **Nonlinear** где можно указать количество итераций. Для сильно нелинейных задач рекомендуется

поставить галочку **Highly nonlinear problem** и увеличить количество итераций.

Для всех режимов кроме **Time Dependent** можно установить галочку **Adaptive Mesh Refinement**, тогда в процессе решения сетка будет уточнена по сложному алгоритму. Если физика и геометрия достаточно сложна, и не очень ясно как задавать параметры сетки, рекомендуется установить эту галочку. Но это увеличит время вычисления.

Кроме того, можно установить **Matrix symmetry** в значение **Symmetric** если матрица симметрична. Чаще всего это бывает, если рассматриваются процессы, например, чистой кондукции тепла или диффузии. При выборе соответствующего линейного решателя это ускорит расчет. Матрицы заведомо несимметричны в мультифизических моделях, моделях связанных с конвекцией или уравнением Навье-Стокса.

Большая часть времени расчета занята решением систем линейных уравнений, отвечает за их решение **Linear system solver**. По умолчанию стоит **Direct(UMFPACK)** этот решатель отнимает много ресурсов компьютера и для моделей требующих длительного расчета можно подобрать более подходящий. Если предыдущий решатель не работает или работает недопустимо долго, можно попробовать **Direct (SPOOLES)** он требует меньше памяти, но работает нестабильно. В крайнем случае выбирается итеративный решатель **GMRES**. Для положительно определенных систем с симметричными матрицами в выбирается **Direct Cholesky (TAUCS)** или итеративный **Conjugate Gradients**. Итеративные решатели потребляют меньше памяти, но надо следить за тем, что они сходятся и в случае необходимости увеличивать количество итераций.

Уравнения чистой кондукции и чистой диффузии в стандартных режимах являются в стационарном состоянии эллиптическими, а в нестационарном параболическими. Для них очень эффективно использовать решатель **Geometric multigrid**. Часто в процессе решения какой-либо задачи, например теплового расчета при конструировании прибора, приходится перебирать большое количество материалов и изменять геометрические параметры. Общие же принципы физической модели остаются теми же. В таком случае можно после длительного расчета стандартным решателем (UMFPACK) попробовать другие, и если они работают быстрее, а результат решения остается тем же, то дальнейшие исследования можно проводить уже с помощью более быстрого решателя – это сэкономит много времени.

Часто после получения решения, модель и её параметры (физические свойства и граничные условия) немного изменяются. И если эти изменения не очень велики, то можно использовать команду **Solve>Update model**, тогда задача пересчитываться не будет, а новые значения будут получены методом интерполяции. Так же можно нажать кнопку **Restart**, тогда задача пересчитается, но за начальные **Init** значения будут заданы те, которые были получены на прошлом этапе. Это может немного ускорить вычисления.

Так же с помощью этой команды можно выявить нестабильность решения: если нажимая эту кнопку без изменения параметров модели мы получаем разные решения (осцилляции численного решения), то это говорит о нестабильности. В этом случае нужно уменьшить сетку или, если эта задача связана с конвекцией, применить Диффузионную стабилизацию в настройках физических свойств модели.

Метод конечных элементов подразумевает дискретизацию пространства. При моделировании явлений переноса в сложных объектах это может привести к нестабильности решения. Нестабильность можно обнаружить увидев большие колебания значений в областях с большими градиентами. Из-за больших колебаний решение может не сходиться. Нажимая **Solve>Restart [Решать>Заново]** новое решение будет отличаться от предыдущего. В случае необходимости, если задача это допускает, можно применить методы стабилизации решения. В пакете COMSOL их существует несколько видов. Они основаны на добавлении малых слагаемых в дифференциальные уравнения.

8. В случае успешного получения решения настраиваем режим отображения и визуализируем результаты численного моделирования.

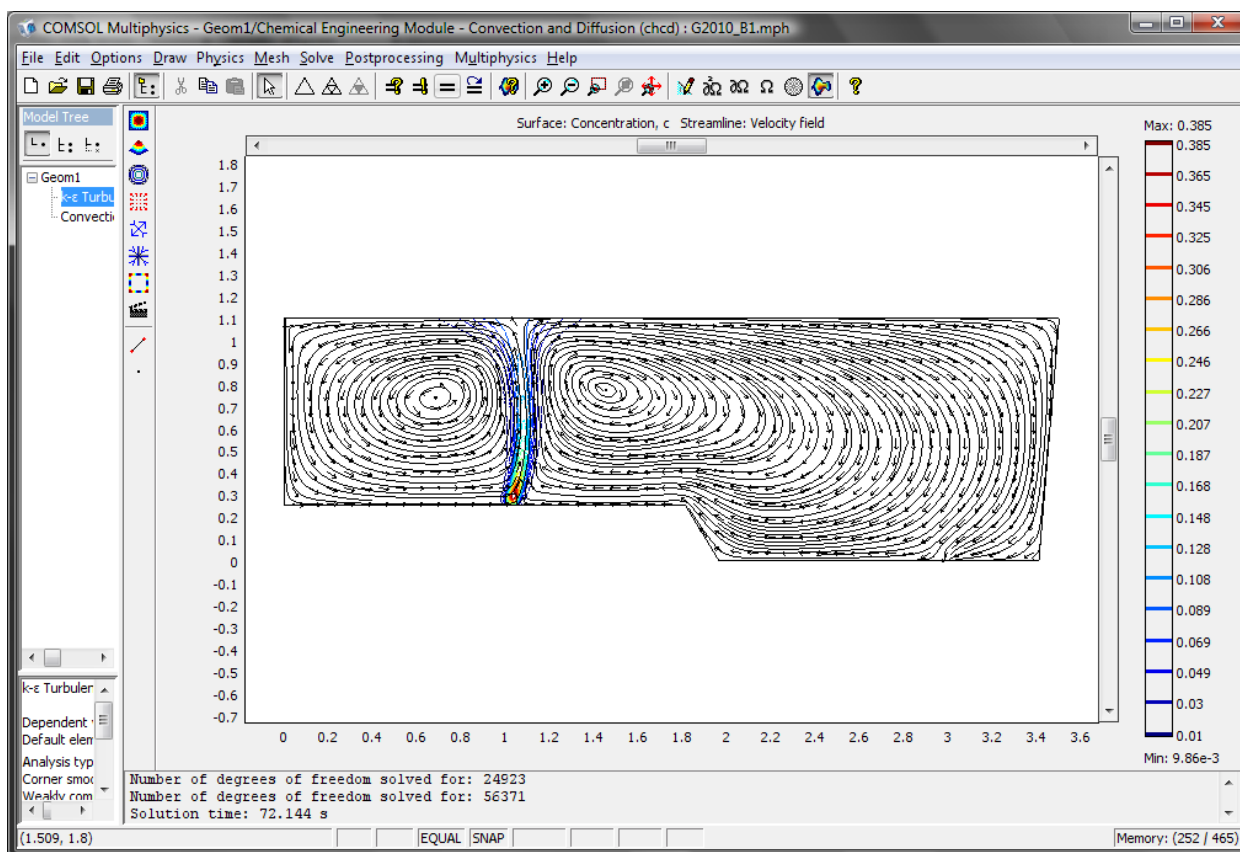


Рис. 6.12. Визуализация результатов решения задачи

Задание теплофизических свойств материалов и начальных условий

Когда геометрия задана и все константы определены, можно приступить к заданию теплофизических свойств.

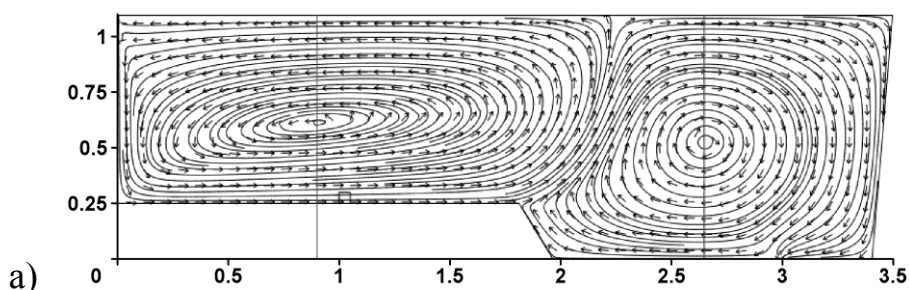
Во вкладке **Physics** надо задать свойства материала, в данном случае теплофизические, для распространенных материалов можно воспользоваться встроенной библиотекой. Кроме этого можно задать дополнительные параметры объекта. В режиме теплопереноса это объемная мощность. В режиме уравнения Навье-Стокса и конвекции это скорость потока по всем осям. В каждом из полей можно вводить математические выражения.

6.5. Анализ результатов численного моделирования влияния энергетических характеристик движения расплава в промежуточном ковше

Конструкция продувочного блока должна обеспечить распад газовой струи на отдельное скопление пузырьков и соответственно пузырьковый режим продувки практически по всей глубине металла в промежуточном ковше [51], что будет соответствовать предложенной математической модели. При этом для гарантированного прохождения пузырька газа через слой покровного шлака диаметр одиночного канала d_0 должен обеспечить формирование газового пузырька диаметром $(4,7-5,2) \times 10^{-3}$ м в зоне отрыва от канала фурмы и 10×10^{-3} м в зоне раздела «металл-шлак».

Были выполнены серии вычислительных экспериментов (А, В, С, D, E, F) для различных режимов продувки и расположения продувочного блока (описание серий см. ниже). Интенсивность продувки варьировалась от 2 м³/час до 6 м³/час. Рассматривался стационарный рабочий уровень заполнения промковша, а также пониженный уровень, имеющий место во время перековшовки. Рассмотрены варианты с наличием и отсутствием вставки, ограничивающей турбулентный придонный участок течения в области удара струи о дно промежуточного ковша [57].

На рисунках 6.13 и 6.14 представлены характерные режимы течения в исследуемой конфигурации промежуточного ковша (соответствуют серии В и F).



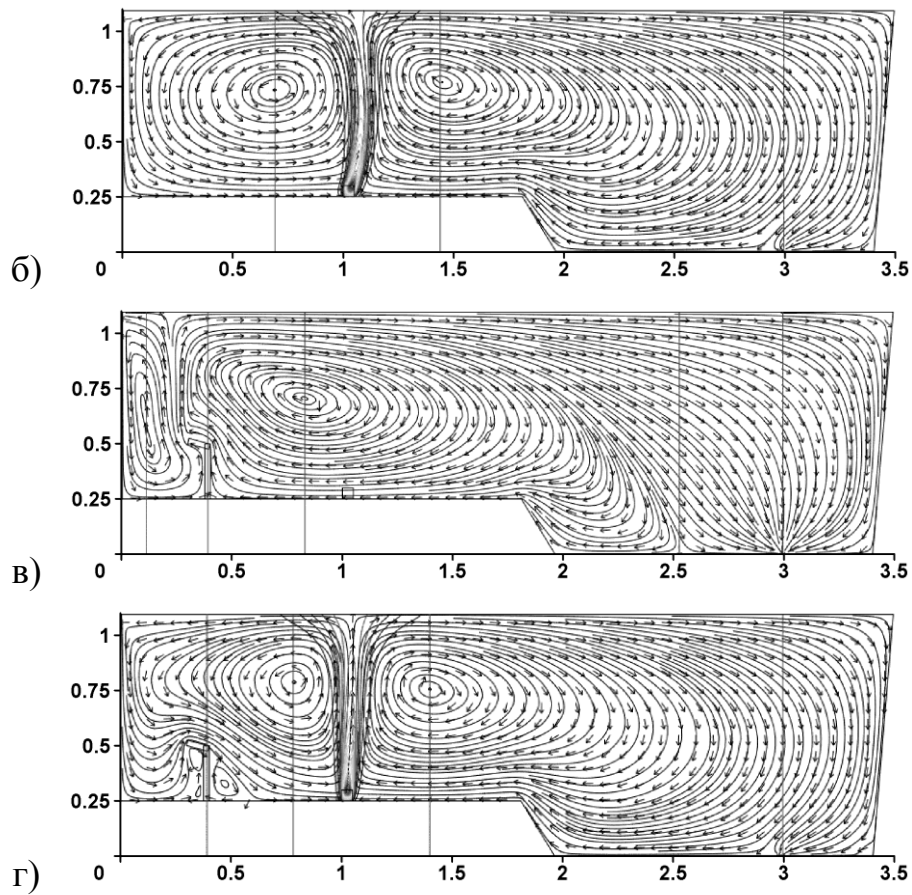
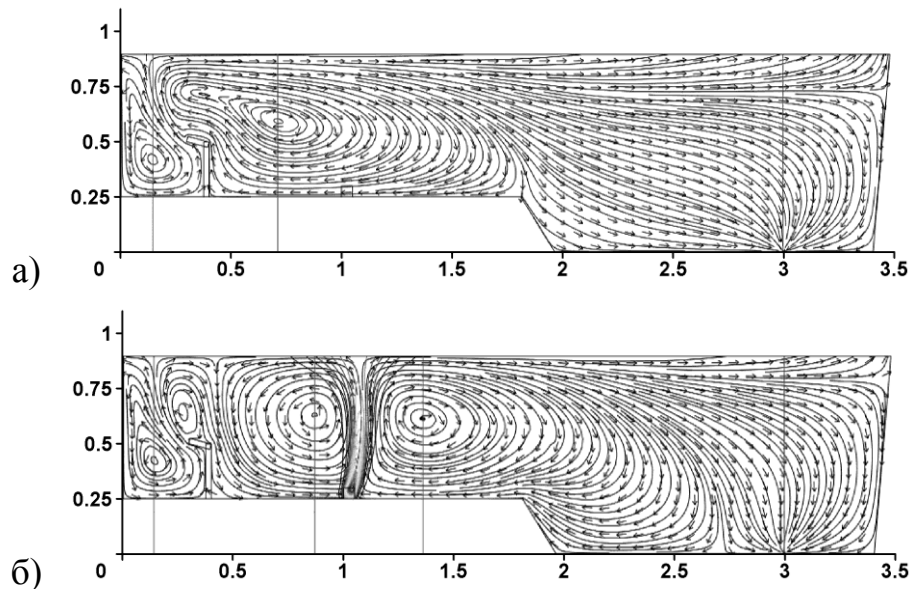


Рис. 6.13. Структура течений в промежуточном ковше (В0,1,12,13):
 а – вариант В0 без продувки; б – вариант В1 с продувкой ($6\text{ м}^3/\text{час}$);
 в, г – варианты В12 и В13 соответственно – то же,
 при наличии вставки типа FOSECO в области падения разливочной струи.



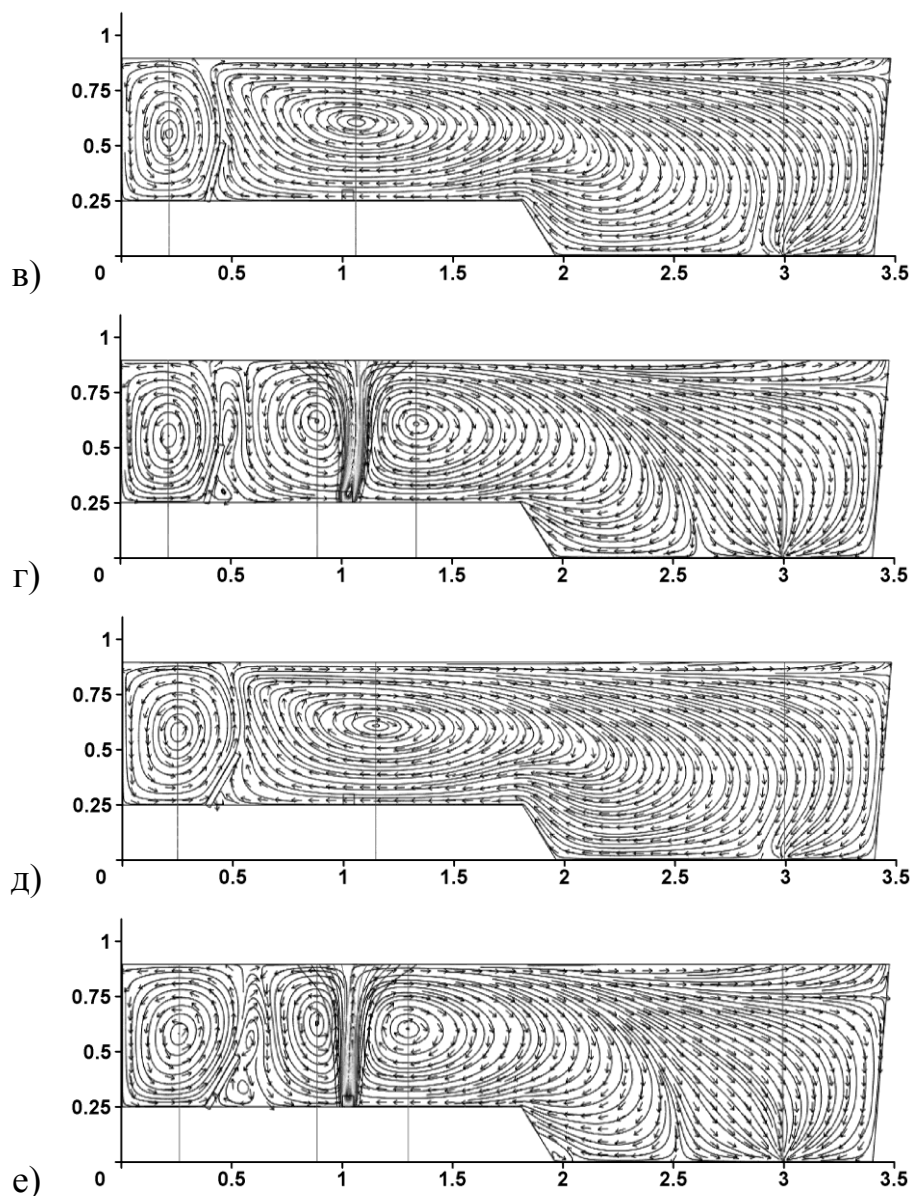


Рис. 6.14. Структура течений в промежуточном ковше (F6,16,1,3,2,4):
 а, в, д – без продувки; б, г, е – с продувкой ($6\text{ м}^3/\text{час}$),
 а, б – со вставкой типа FOSECO; в, г – с наклонной вставкой
 с углом наклона 15° ; д, е – то же, с углом наклона 30° .

В соответствии с теорией струйных течений, развивающихся в ограниченном пространстве [58, 59], можно выделить следующие характерные зоны (рис. 6.15):

- 1 – зона прямого (транзитного) потока длиной L ;
- 2 – зона обратного (циркуляционного) потока;
- 3 – участок, где зона 2 захватывает жидкий металл;
- 4 – участок, расположенный в верхней части зоны обратного потока вблизи перегородки, где происходит пополнение прямого течения за счет жидкого металла из зоны обратной циркуляции.

В пределах зоны обратного потока происходит всплытие неметаллических включений и их возможная коагуляция (укрупнение). В пределах участ-

ка 4 происходит пополнение прямого течения за счет жидкого металла из зоны обратной циркуляции, обогащенного укрупненными блоками неметаллических включений.

Как видно из рис. 6.13, а, простая конструкция промковша при отсутствии продувки не способствует удалению неметаллических включений из-за неудачной структуры формируемых вихревых зон с большой областью прямого придонного течения. Лишь только небольшой участок у боковой стенки обеспечивает доставку включений к шлаку.

Организация вставки, ограничивающей придонную турбулентную зону в области падения разливочной струи (рис. 6.13, в) ситуацию улучшает, подавляя придонное течение, но и в этом случае зона прямого приповерхностного потока невелика – на значительный участок приходится застойное ниспадающее течение, где вынос неметаллических включений к шлаку затруднен.

Совершенно по другому выглядит обстановка в ПК при наличии продувки (рис. 6.13, б, г). В данном случае при оптимальном удалении продувочного блока от оси разливочной струи можно получить зону прямого потока максимальной протяженности. При этом значительно увеличивается коэффициент рециркуляции в зоне обратного потока.

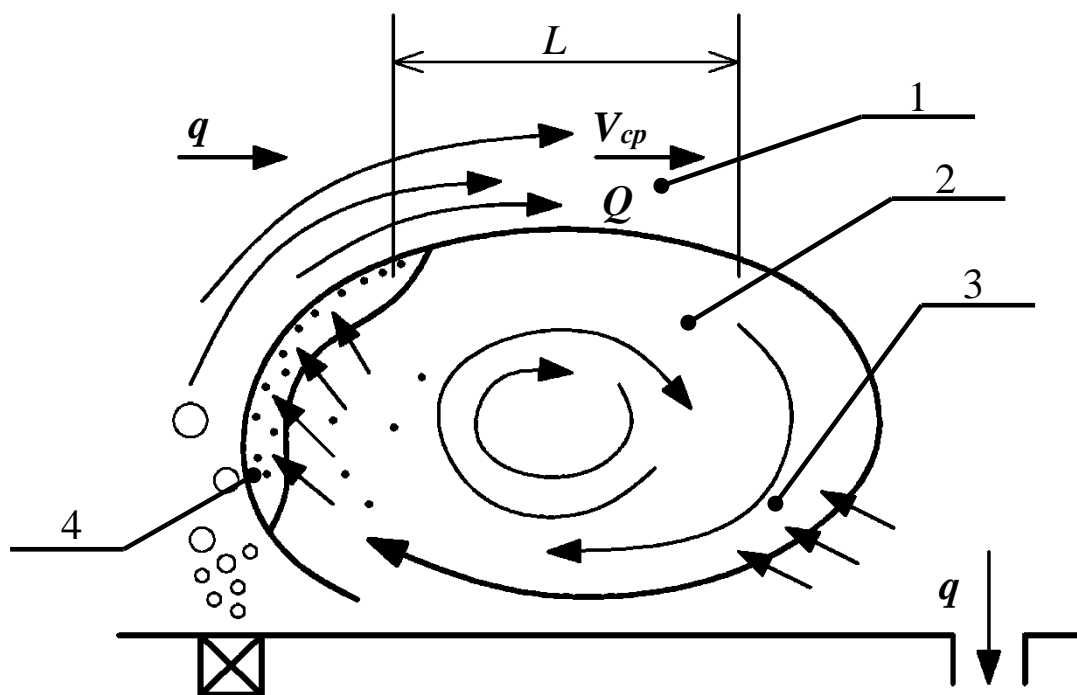


Рис. 6.15. Характерные зоны течений в ограниченном пространстве промежуточного ковша МНЛЗ

Для определения эффективности удаления неметаллических включений в промежуточном ковше МНЛЗ можно выделить эпюру горизонтальной (продольной) скорости V_x в вертикальном сечении y , проходящем через центр зоны обратной циркуляции.

На рис. 6.16, а показано распределение скорости V_x без продувки, на рис. 6.16, б – с продувкой. Следует отметить, что глубина зоны прямого потока без продувки в несколько раз больше, чем с продувкой. При этом при средней скорости течения жидкого металла в указанных зонах соответственно 0,02 и 0,2 м/с время пребывания частицы, расположенной на нижнем горизонте, в зоне прямого течения в первом случае будет значительно больше. Скорость преодоления глубины зоны прямого течения частицей с начального уровня до границы раздела «шлак-металл» будет равна 0,004 м/с и 0,0125 м/с соответственно.

То есть можно утверждать, что с высокой степенью вероятности частицы диаметром более $(0,08-0,10) \times 10^{-3}$ м для варианта без продувки и $(0,10-0,12) \times 10^{-3}$ м при продувке будут удаляться полностью.

Приведенные рассуждения оценки отвечают модели «идеального» удаления. Но в действительности следует учитывать существование зоны обратной циркуляции. В частности, коэффициент обмена $K_{об}$ можно вычислить по приведенным эпюрам скорости по формуле

$$K_{об} = \frac{Q_{mp} - q}{q}, \quad (6.33)$$

где Q_{mp} – расход прямого потока, м³/с; q – расход, который поступает в промежуточный ковш и уходит в кристаллизатор, м³/с.

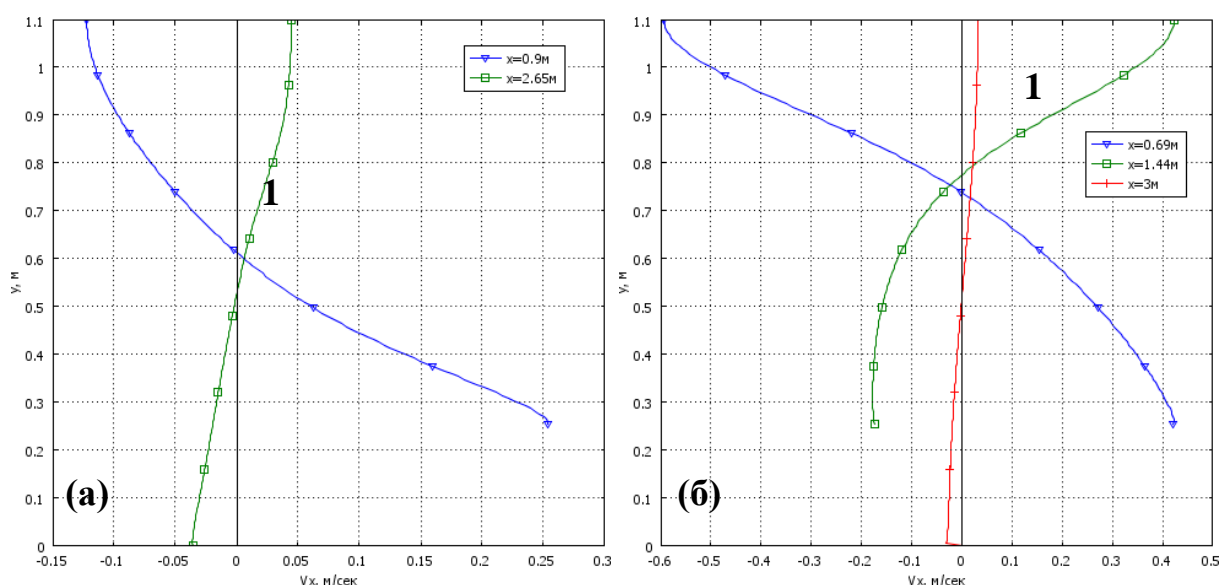


Рис. 6.16. Эпюры горизонтальной скорости V_x в вертикальном сечении y , проходящем через центр зоны обратной циркуляции (1):
а – без продувки (см. рис. 6.13, а); б – с продувкой (см. рис. 6.13, б)

Полученные данные показывают, что величина диаметра полностью удаляемых включений выше, чем для случая без учета циркуляции и составляет $(0,13-0,15) \times 10^{-3}$ м.

Для объяснения явления удаления неметаллических включений меньших размеров надо учесть основные закономерности образования и движе-

ния газообразных сферических тел в многофазной среде. В момент образования газовых пузырей жидкая фаза, содержащая включения, вытесняется в приграничную зону сферического тела. При этом за газовым пузырьком движется объем жидкости (присоединенная масса), равный 0,5 объема газового пузырька и обогащенный неметаллическими включениями, которые «стекают» со сферической поверхности в зоне отрыва пограничного слоя [60].

Если выполнить условие, чтобы весь объем металла, поступающий в промежуточный ковш, транспортировался в зону раздела «шлак-металл», как присоединенная масса, то для этого необходимо подать расход газа в виде совокупности отдельных пузырьков с учетом теплового расширения при температуре среды в 2 раза больший, чем объемный расход металла. Что в пересчете на условия подаваемого холодного аргона соответствует 6-7 м³/час. Близкое значение расхода газа получено из условий минимизации возмущений на границе раздела «шлак-металл» [51].

6.6. Оценка влияния продувки на тепловые потери и теплообменные процессы

При массовой скорости поступления металла 5368 кг/мин тепло, вносимое в промежуточный ковш с новыми порциями расплава составляет $Q_c = 4,84 \cdot 10^7$ Дж/мин. Для газа, который вдувается с массовой скоростью 6 м³/час вносимое тепло составляет $Q_r = 166$ Дж/мин. Таким образом, тепловой вклад указанного объема газа, составляет 0,003% от теплового вклада поступающего в промковш металла и практически не влияет на тепловую обстановку в ванне промежуточного ковша [61].

Для определения теплообменных процессов на границе газовый пузырь – жидкий расплав, необходимо знать скорость всплывания пузыря в расплаве. В работе [62], автор рассмотрел четыре области, для которых установлены различные расчетные соотношения для газовых пузырей диаметром от 0 до 20 мм (этот интервал размеров газовых пузырей, соответствует размерам пузырей истекающих из формы на дне промковша). Однако, деление области на 4 зоны нельзя считать естественным отражением механизма скорости всплытия пузыря в данной среде. Поэтому предложено рассмотреть область всплытия применительно к данному объекту (промежуточному ковшу). Для этого определены значения компонент скорости по высоте в зоне предполагаемого расположения фурмы (рис. 6.13, б) и определено значение числа Рейнольдса в этой зоне (рис. 6.17).

Это позволило определить формулу для расчета скорости всплытия пузыря:

$$v = \left(\frac{4g^2\sigma(\gamma_p - \gamma_r)}{\xi^2\gamma_p^2} \right)^{1/4} \quad (6.34)$$

где γ_p – удельный вес (индексы р и Г – соответствуют расплаву и газу), γ_r – динамическая вязкость, r – радиус пузыря ξ – коэффициент трения, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Согласно формуле (6.34) определена скорость всплытия газового пузыря 0.23 м/с. Это согласуется с экспериментальными исследованиями [63], где скорость всплытия равна 0.3 м/с.

Знание скорости всплытия пузыря в ванне промковша, позволяет определить время его нахождения в расплаве. Для ванны промковша глубиной 0,85 м эта величина равна 4 сек.

Оценим, как быстро прогревается газ во всплывающем пузыре. Для этого предлагается следующая математическая модель. Выделяется половина сферического объема (процесс считается симметричным) в расплаве радиусом 0.3 м. На границах этой сферы задается условие на бесконечности. Так как в рассматриваемом случае температура изменяется только в направлении радиуса шара, то дифференциальное уравнение теплопроводности в сферических координатах принимает вид.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right). \quad (6.35)$$

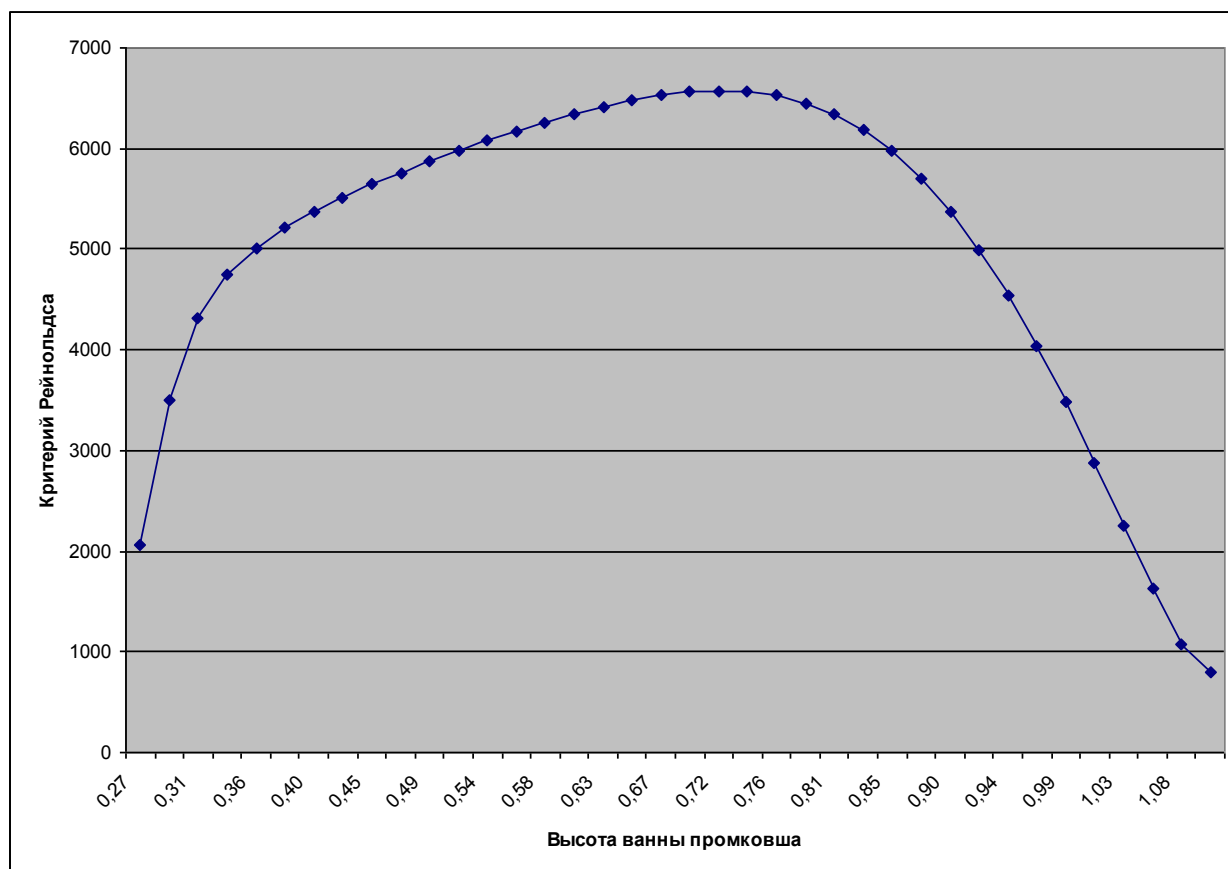


Рис. 6.17. Распределение значений числа Рейнольдса по высоте промковша в области расположения фурмы

Начальные условия в расплаве $T_0=1539^\circ\text{C}$, в газовом пузыре – 20°C . Предполагается, что процесс всплытия столь кратковременный, что на границе выделенного объема и расплава температура не изменится; в центре пузыря условие симметрии. Особое внимание следует уделить условию на гра-

нице расплав – газовая среда (предполагается, что газ в случае нагревания не расширяется). Здесь возможно рассмотреть два варианта:

первый – контакт между расплавом и оболочкой пузыря идеальный:

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r|_p} = \lambda_\Gamma \frac{\partial T}{\partial r|_\Gamma}, \quad T|_p = T|_\Gamma; \quad (6.36)$$

второй – передача тепла от расплава к газовой оболочке осуществляется с помощью излучения:

$$\lambda_p \frac{\partial T}{\partial r|_p} = \lambda_\Gamma \frac{\partial T}{\partial r|_\Gamma}, \quad \lambda_p \frac{\partial T}{\partial r|_p} = -\alpha_p (T - T|_\Gamma), \quad (6.37)$$

где α_p – коэффициент теплоотдачи, определяемый из условия [64]

$$\alpha_p = 0,186 \left(\frac{\Delta T}{100} \right)^3. \quad (6.38)$$

Численное моделирование с применением конечно-разностной схемы, реализованной в среде Delphi, показало, что прогрев полости газового пузыря осуществляется за 0,001 с при идеальном контакте, и за 0,00005 с для излучения (рис. 6.18).

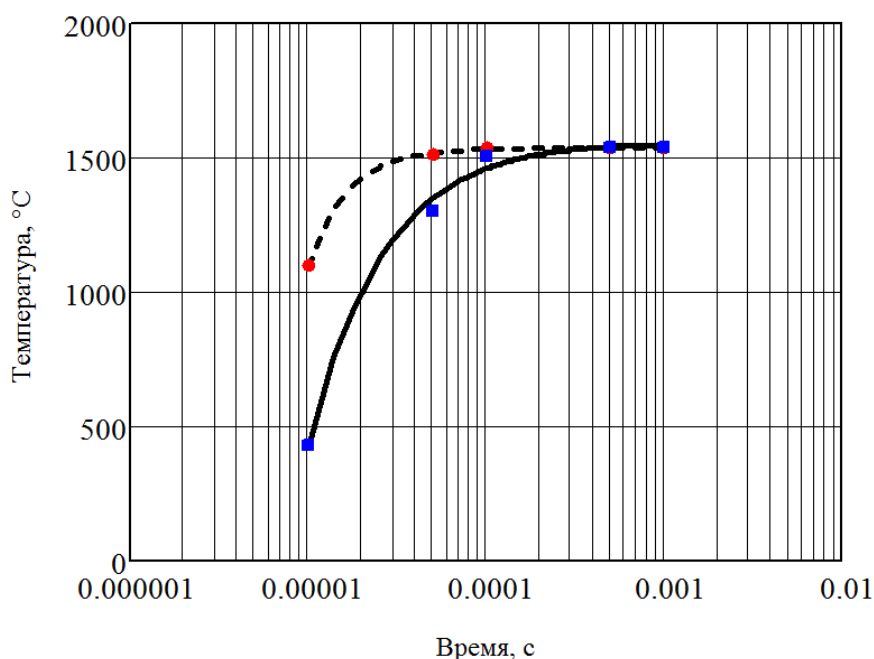


Рис. 6.18. Распределение значений числа Рейнольдса по высоте промковша в области расположения фурмы
 - - - - радиация, ——— - кондукция.

Таким образом, газовый пузырь прогревается в полости ванны промковша практически сразу и не влияет на тепловую обстановку в расплаве. При моделировании процесса теплообмена в системе расплав – газовый пузырь необходимо учитывать радиационный теплообмен.

6.7. Влияние турбулентной энергии расплава на процессы удаления неметаллических включений и теплообмена

Наиболее эффективно процесс непрерывного рафинирования в промежуточном ковше МНЛЗ будет протекать, если вследствие трансформации гидрогазодинамических течений (например, при установке перегородок, порогов, металлоприемников и при продувке инертным газом) будет обеспечено транспортирование жидкого металла, обогащенного неметаллическими включениями, в зону контакта "жидкий металл – рафинирующий шлак".

Для анализа влияния гидрогазодинамических потоков, развивающихся в ограниченном пространстве промежуточного ковша МНЛЗ, на интенсивность теплообмена и процесс удаления неметаллических включений можно применять критерии на основе интегральных величин значений удельной кинетической энергии осредненного движения K и удельной кинетической энергии турбулентного движения K_T характерных зон (Ω) течения (рис. 6.19):

$$K = \frac{1}{2S} \iint_{\Omega} (u^2 + v^2) dx dy; \quad K_T = \frac{1}{S} \iint_{\Omega} k dx dy,$$

где u, v, k – локальные значения проекций скорости и кинетической энергии турбулентного движения, получаемой из модели k - ε , соответственно; $S = \iint_{\Omega} dx dy$ – площадь выделенной зоны течения Ω . Интегралы приведены

для случая рассматриваемой модельной задачи в плоскости.

Выделение характерных зон (рис. 6.6) производится по контурам изолиний, проходящих на границах раздела циркуляционных и прямых течений. Если масса металла в ковше $M=40000$ кг, то кинетическую энергию зоны с площадью S можно определить с помощью формулы $K_{\text{зоны}} = \frac{M}{S} K$.

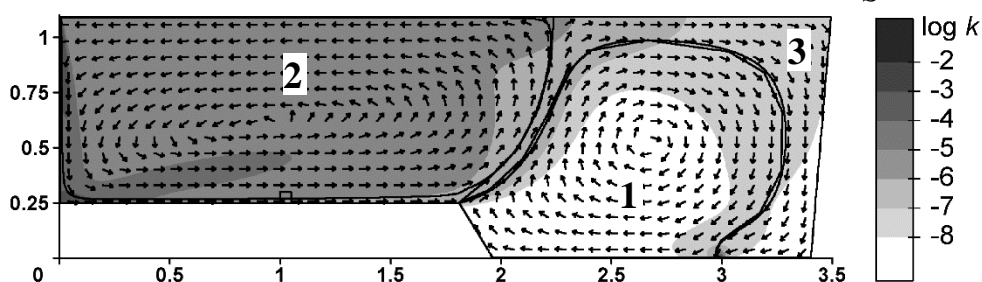


Рис. 6.19. Пример характерных зон потоков в промежуточном ковше: 1, 2 – зоны циркуляции (Ω_1 и Ω_2); 3 – зона прямого течения (Ω_3).

Результаты анализа расчетов для различных конфигураций и режимов работы промежуточного ковша сведены в таблицы 6.2 – 6.7.

Серия В (таблица 6.2) соответствует стандартному двухручьевому промежуточному ковшу без внутренних конструктивных элементов и вставке (турбостоп), ограничивающей придонный турбулентный участок струи типа FOSECO.

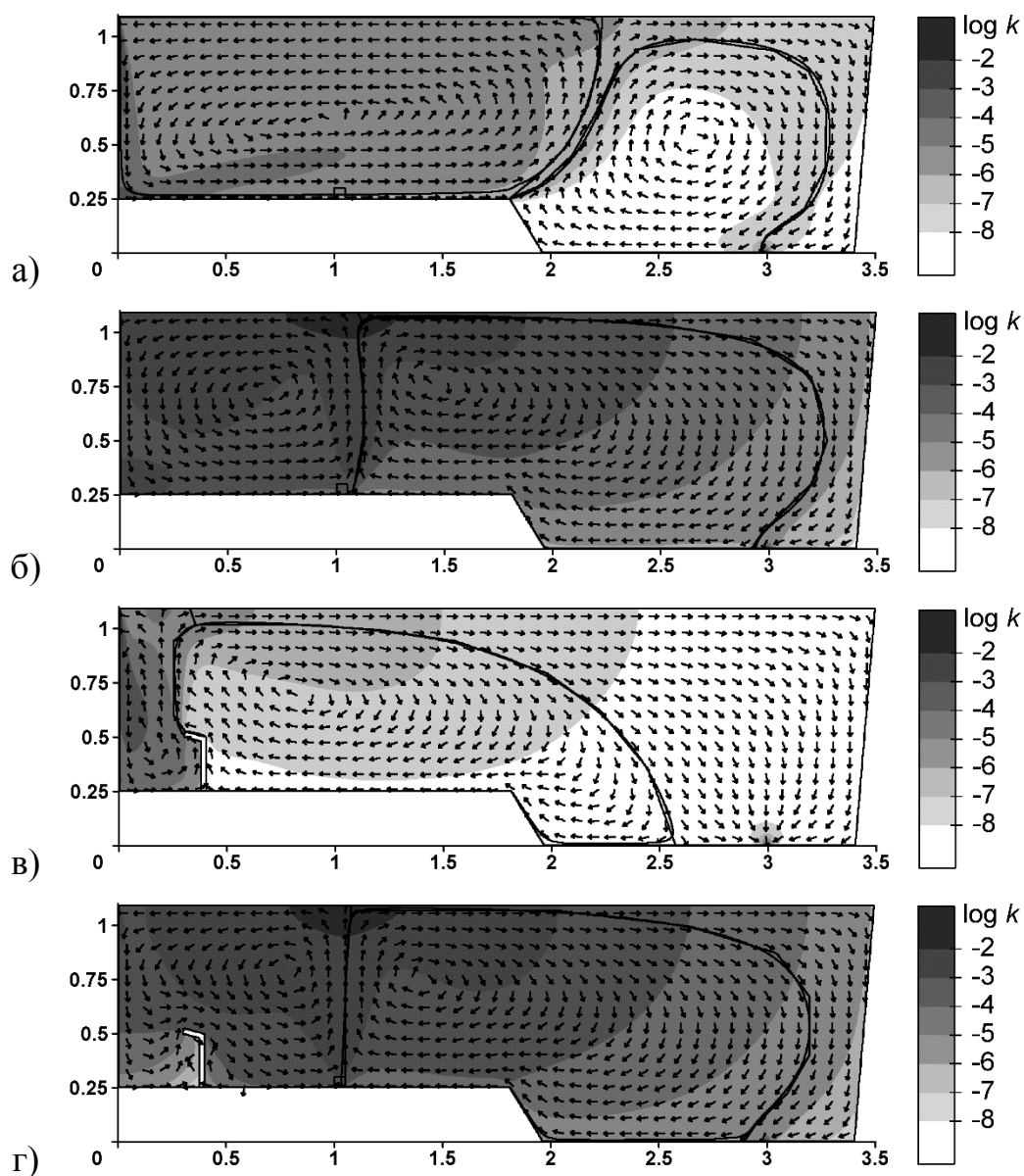


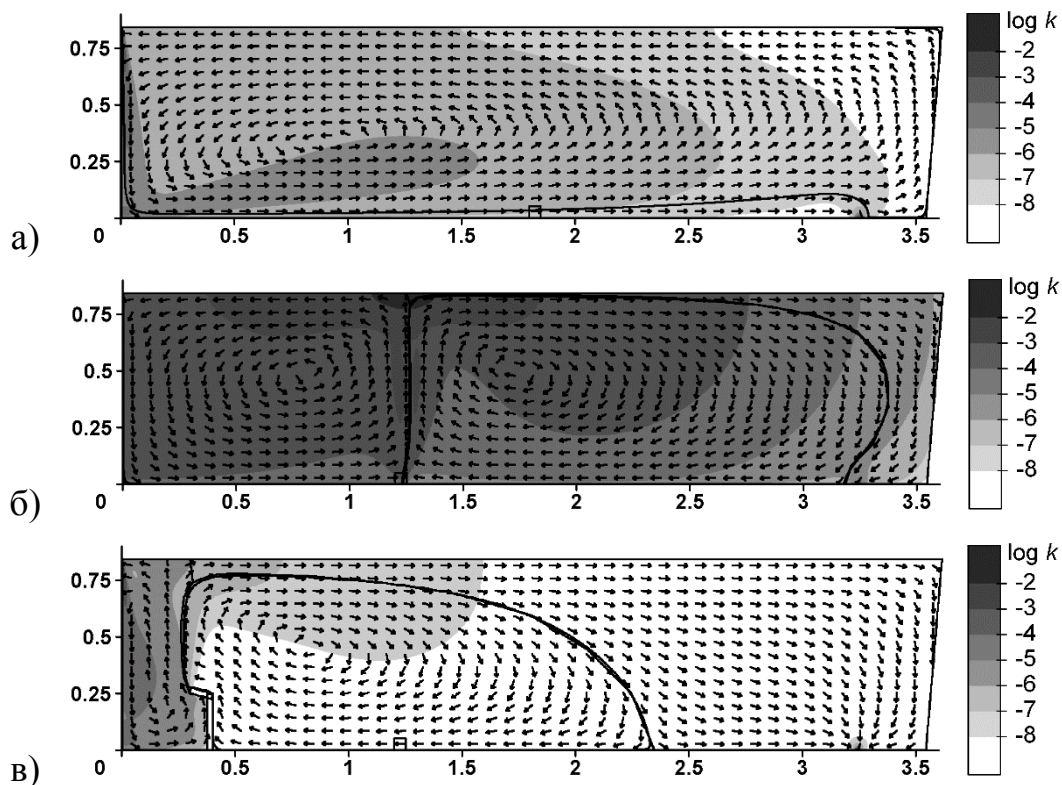
Рис. 6.20. Распределение турбулентной кинетической энергии, варианты (В0,1,12,13)

Таблица 6.2. Средняя кинетическая энергия и турбулентная кинетическая энергия по зонам

Вариант	В0	В1 (продувка)	В12 – (турбостоп)	В13 (продувка) (турбостоп)
Зона 1				
Площадь S , м ²	1.802695	0.945	0.256654	0.889542
K , (Дж/кг)×м ²	0.013385	0.057326	0.004146	0.022068
K_T , (Дж/кг)×м ²	0.008317	0.059685	0.003197	0.050404
K/S , Дж/кг	0.007425	0.060662	0.016154	0.024808
K_T/S , Дж/кг	0.004614	0.063159	0.012456	0.056663
Зона 2				
Площадь S , м ²	1.057137	1.936813	1.535951	1.917437

$K, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.0004362	0.016965	0.000524	0.022063
$K_T, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.0004164	0.042668	0.00102	0.055943
$K/S, \text{Дж/кг}$	0.0004127	0.008759	0.0003412	0.011507
$K_T/S, \text{Дж/кг}$	0.0003939	0.02203	0.0006641	0.029176
Зона 3				
Площадь $S, \text{м}^2$	0.468554	0.446573	1.527511	0.513136
$K, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.0003807	0.001695	0.0003399	0.00181
$K_T, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.0004015	0.004848	0.0005317	0.006078
$K/S, \text{Дж/кг}$	0.0008126	0.003796	0.0002225	0.003527
$K_T/S, \text{Дж/кг}$	0.000857	0.010856	0.0003481	0.011845
Весь промежуточный ковш				
Площадь $S, \text{м}^2$	3.328386	3.328386	3.320115	3.320115
$K, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.014201	0.075986	0.00501	0.045942
$K_T, (\text{Дж/кг}) \times \text{м}^2$	0.00865	0.109373	0.004701	0.112048
$K/S, \text{Дж/кг}$	0.004267	0.02283	0.001509	0.013837
$K_T/S, \text{Дж/кг}$	0.002599	0.032861	0.001416	0.033748

Серия С (таблица 6.3) соответствует промежуточному ковшу без донных уступов в окрестности разливочных секций пропорционально высоте пониженного уровня расплава, также без внутренних конструктивных элементов и со вставкой типа FOSECO.



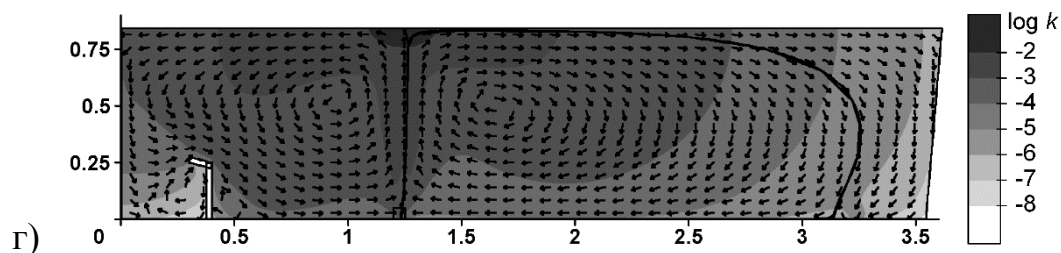


Рис. 6.21. Распределение турбулентной кинетической энергии, варианты (С0,4,9,11)

Таблица 6.3. Средняя кинетическая энергия и турбулентная кинетическая энергия по зонам

Вариант	С0	С4 (продувка)	С9 (турбостоп)	С11 (продувка) (турбостоп)
Зона 1				
Площадь S , м ²	0.149996	1.068456	0.259206	1.058519
K , (Дж/кг)×м ²	0.001525	0.036862	0.001717	0.021207
K_T , (Дж/кг)×м ²	0.0002393	0.039843	0.001359	0.038515
K/S , Дж/кг	0.010167	0.0345	0.006624	0.020035
K_T/S , Дж/кг	0.001595	0.03729	0.005243	0.036386
Зона 2				
Площадь S , м ²	2.897769	1.655773	1.300263	1.55478
K , (Дж/кг)×м ²	0.005039	0.023457	0.0001991	0.019779
K_T , (Дж/кг)×м ²	0.004073	0.034797	0.0004056	0.037419
K/S , Дж/кг	0.001739	0.014167	0.0001531	0.012721
K_T/S , Дж/кг	0.001406	0.021016	0.000312	0.024067
Зона 3				
Площадь S , м ²	–	0.323535	1.480026	0.426197
K , (Дж/кг)×м ²	–	0.00133	0.0001317	0.000943
K_T , (Дж/кг)×м ²	–	0.003054	0.0002293	0.003584
K/S , Дж/кг	–	0.004109	0.000089	0.002213
K_T/S , Дж/кг	–	0.00944	0.000155	0.008409
Весь промежуточный ковш				
Площадь S , м ²	3.047765	3.047765	3.039495	3.039495
K , (Дж/кг)×м ²	0.006564	0.061648	0.002048	0.041929
K_T , (Дж/кг)×м ²	0.004312	0.077694	0.001994	0.079517
K/S , Дж/кг	0.002154	0.020227	0.0006738	0.013795
K_T/S , Дж/кг	0.001415	0.025492	0.000656	0.026161

Серия D1-D4 (таблица 6.4) стандартному двухручьевому промежуточному ковшу без внутренних конструктивных элементов и с альтернативной

наклонной вставкой, ограничивающей придонный турбулентный участок струи для двух углов её наклона 15° и 30° соответственно.

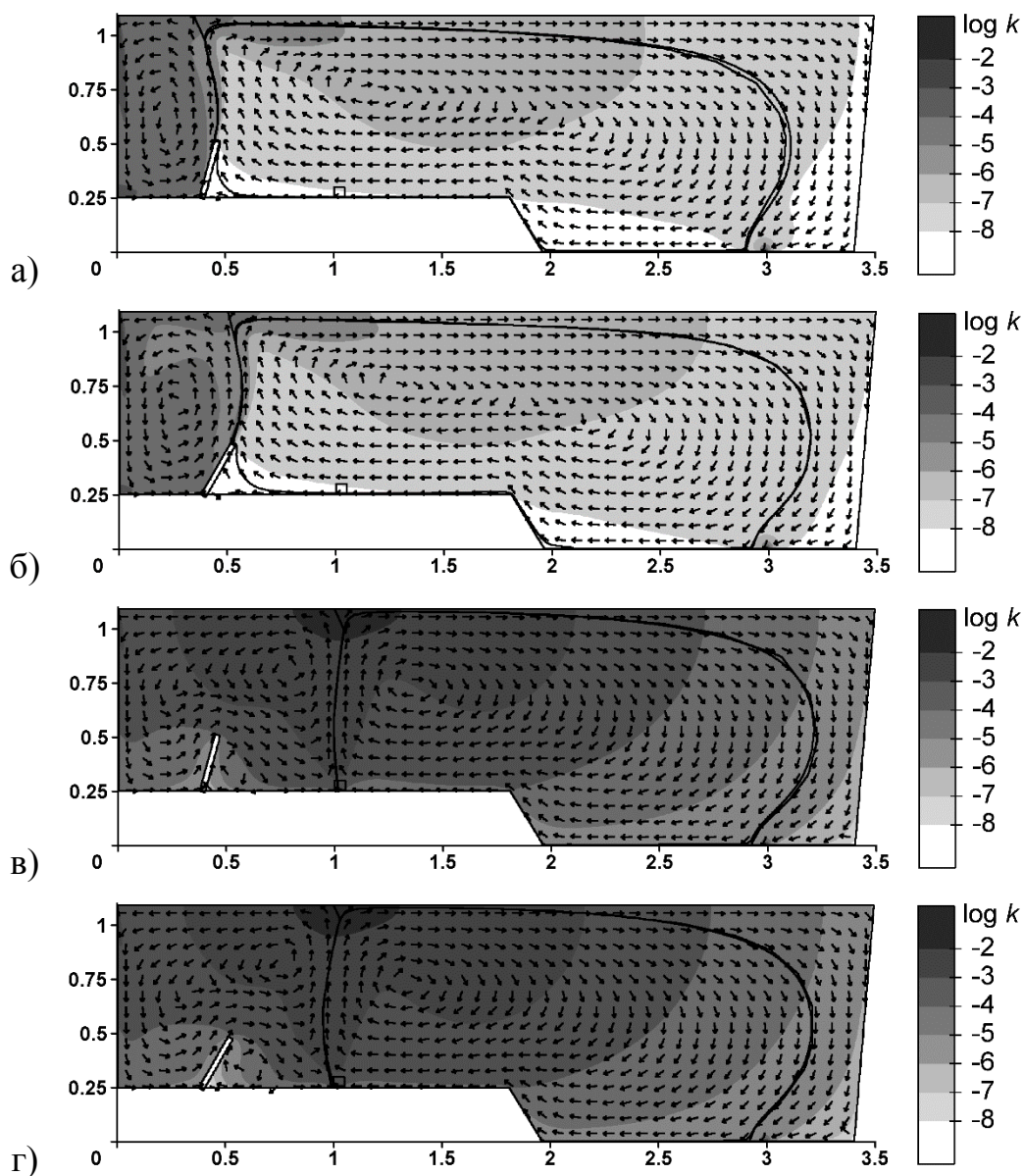


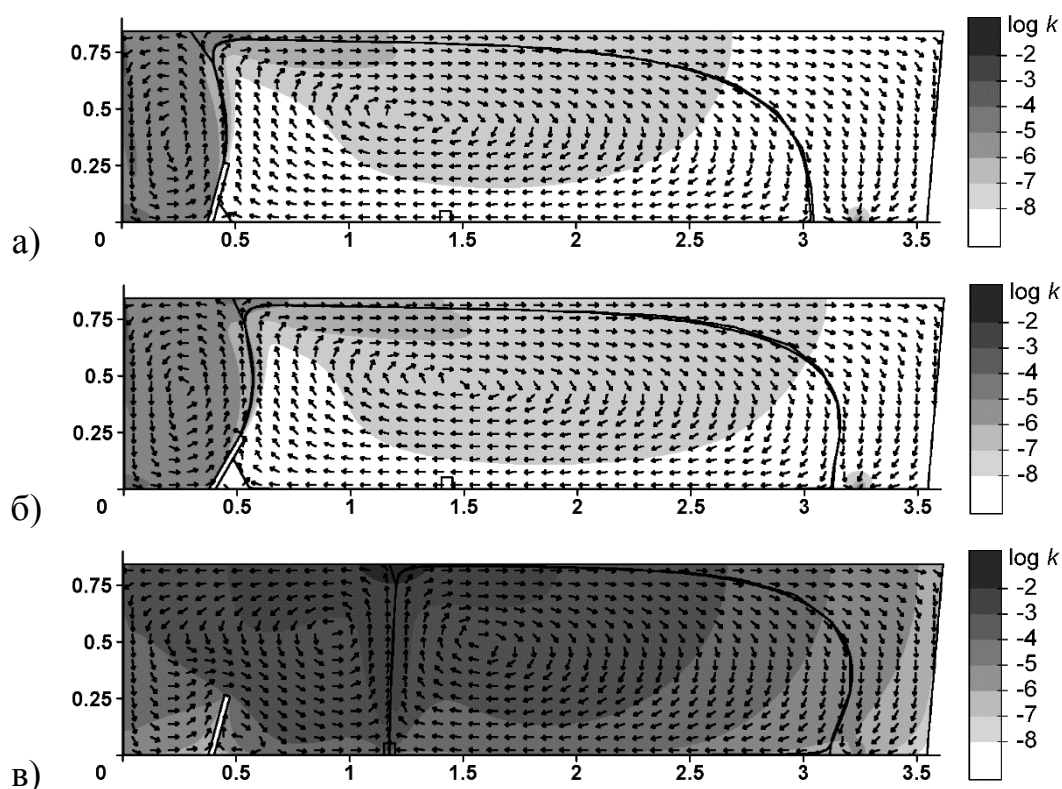
Рис. 6.22. Распределение турбулентной кинетической энергии, варианты (D1,2,3,4)

Таблица 6.4 Средняя кинетическая энергия и турбулентная кинетическая энергия по зонам

Вариант	D1 – (15°)	D2 – (30°)	D3 (продувка) (15°)	D4 (продувка) (30°)
Зона 1				
Площадь S , m^2	0.359204	0.437752	0.854106	0.824679
K , $(Дж/кг) \times m^2$	0.010125	0.012669	0.015641	0.013215
K_T , $(Дж/кг) \times m^2$	0.003967	0.003862	0.0435	0.038025

K/S, Дж/кг	0.028187	0.02894	0.018312	0.016024
K _T /S, Дж/кг	0.011044	0.008822	0.050931	0.046109
Зона 2				
Площадь S, м ²	2.210041	2.283624	1.991086	2.009119
K, (Дж/кг)×м ²	0.001525	0.001746	0.028537	0.033475
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.001967	0.00217	0.064861	0.072167
K/S, Дж/кг	0.0006898	0.0007646	0.014332	0.016661
K _T /S, Дж/кг	0.00089	0.0009502	0.032576	0.03592
Зона 3				
Площадь S, м ²	0.752349	0.600315	0.476403	0.487893
K, (Дж/кг)×м ²	0.0008005	0.0008115	0.001282	0.001364
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.0006319	0.000569	0.005975	0.006009
K/S, Дж/кг	0.001064	0.001352	0.00269	0.002795
K _T /S, Дж/кг	0.0008399	0.0009479	0.012542	0.012316
Весь промежуточный ковш				
Площадь S, м ²	3.321594	3.321691	3.321594	3.321691
K, (Дж/кг)×м ²	0.01245	0.015226	0.045459	0.048053
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.006566	0.006601	0.114336	0.116201
K/S, Дж/кг	0.003748	0.004584	0.013686	0.014466
K _T /S, Дж/кг	0.001977	0.001987	0.034422	0.034983

Серия D5-D8 (таблица 6.5) соответствует промежуточному ковшу без донных уступов, также без внутренних конструктивных элементов и с альтернативной наклонной вставкой с двумя углами её наклона 15° и 30°.



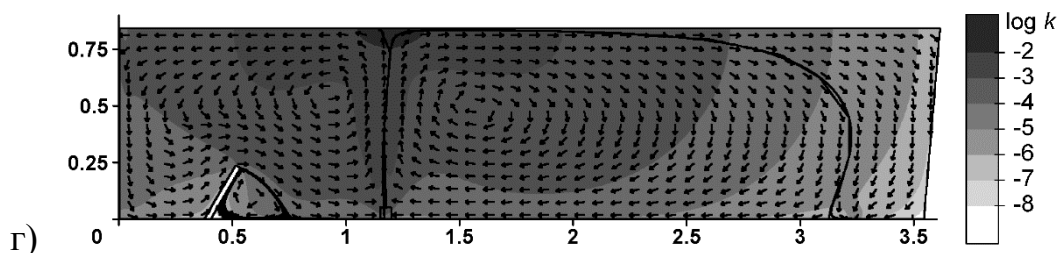


Рис. 6.23. Распределение турбулентной кинетической энергии, варианты (D5,6,7,8)

Таблица 6.5. Средняя кинетическая энергия и турбулентная кинетическая энергия по зонам

Вариант	D5 – (15°)	D6 – (30°)	D7 (продувка) (15°)	D8 (продувка) (30°)
Зона 1				
Площадь S, м ²	0.353018	0.436954	1.001127	0.992315
K, (Дж/кг)×м ²	0.004359	0.00612	0.0154	0.014018
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.001681	0.001787	0.035766	0.033704
K/S, Дж/кг	0.012346	0.014006	0.015382	0.014126
K _T /S, Дж/кг	0.004762	0.00409	0.035725	0.033965
Зона 2				
Площадь S, м ²	1.899977	2.002169	1.58287	1.599091
K, (Дж/кг)×м ²	0.000723	0.0009775	0.021711	0.023268
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.0008292	0.00101	0.040145	0.042275
K/S, Дж/кг	0.0003805	0.0004882	0.013716	0.014551
K _T /S, Дж/кг	0.0004364	0.0005045	0.025362	0.026437
Зона 3				
Площадь S, м ²	0.787979	0.601948	0.456976	0.449665
K, (Дж/кг)×м ²	0.0003142	0.0003463	0.000868	0.000802
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.00028	0.0002525	0.003725	0.003848
K/S, Дж/кг	0.0003988	0.0005753	0.001899	0.001784
K _T /S, Дж/кг	0.0003553	0.0004194	0.008151	0.008558
Весь промежуточный ковш				
Площадь S, м ²	3.040974	3.041071	3.040974	3.041071
K, (Дж/кг)×м ²	0.005398	0.007444	0.037979	0.038088
K _T , (Дж/кг)×м ²	0.00279	0.00305	0.079635	0.079827
K/S, Дж/кг	0.001775	0.002448	0.012489	0.012525
K _T /S, Дж/кг	0.0009175	0.001003	0.026187	0.02625

Анализ подобным способом расчетов в соответствии с моделью, полученной в данных исследованиях, показывает (таблицы 6.6, 6.7), что для случая дна с уступом (рис. 6.1) применение порогов/металлоприемников в цен-

тральной части проковша приводит к снижению турбулизации всего металла в объеме на 7-16%, применение продувки в поперечном сечении проковша повышает её на 29-33%.

В случае продувки область интенсивного турбулентного движения сосредоточена в окрестности всплывающего газо-жидкостного течения. Дополнительное применение порогов при этом не имеет заметного влияния на соотношение объемов выделенных зон, но приводит к тормозящему эффекту, снижая скорости движения расплава в среднем на 20%, а в зоне всплытия включений на 15-30% и дает обратный эффект усиления на 10-40% (в зависимости от геометрии) турбулизации расплава, находящегося на периферии за продувочным блоком.

Используя подобный подход можно выявить качественные и количественные особенности исследуемых гидро-газодинамических потоков, влияющие на время пребывания расплава в зонах и интенсивность протекающих в них процессов.

Таблица 6.6. Соотношение зон, а также кинетической энергии и турбулентной кинетической энергии потоков в промежуточном ковше

Вариант	B0	D1 D2		B1	D3 D4		C0	D5 D6		C4	D7 D8	
		15°	30°		П*	П 15°		П 30°	15°		30°	П
Зона 1												
S1/S	0,54	0,11	0,13	0,28	0,26	0,25	0,05	0,12	0,14	0,35	0,33	0,33
K _T /K	0,62	0,39	0,30	1,04	2,78	2,88	0,16	0,39	0,29	1,08	2,32	2,40
K/(K _T +K)	0,62	0,72	0,77	0,49	0,26	0,26	0,86	0,72	0,77	0,48	0,30	0,29
K _T /(K _T +K)	0,38	0,28	0,23	0,51	0,74	0,74	0,14	0,28	0,23	0,52	0,70	0,71
Зона 2												
S2/S	0,32	0,67	0,69	0,58	0,60	0,60	0,95	0,62	0,66	0,54	0,52	0,53
K _T /K	0,95	1,29	1,24	2,52	2,27	2,16	0,81	1,15	1,03	1,48	1,85	1,82
K/(K _T +K)	0,51	0,44	0,45	0,28	0,31	0,32	0,55	0,47	0,49	0,40	0,35	0,36
K _T /(K _T +K)	0,49	0,56	0,55	0,72	0,69	0,68	0,45	0,53	0,51	0,60	0,65	0,64
Зона 3												
S3/S	0,14	0,23	0,18	0,13	0,14	0,15	0,26	0,20	0,11	0,15	0,15	0,15
K _T /K	1,05	0,79	0,70	2,86	4,66	4,41	0,89	0,73	0,73	2,30	4,29	4,80
K/(K _T +K)	0,49	0,56	0,59	0,26	0,18	0,18	0,53	0,58	0,58	0,30	0,19	0,17
K _T /(K _T +K)	0,51	0,44	0,41	0,74	0,82	0,82	0,47	0,42	0,42	0,70	0,81	0,83
Весь проковш												
K _T /K	0,61	0,53	0,43	1,44	2,52	2,42	0,66	0,52	0,41	1,26	2,10	2,10
K/(K _T +K)	0,62	0,65	0,70	0,41	0,28	0,29	0,60	0,66	0,71	0,44	0,32	0,32
K _T /(K _T +K)	0,38	0,35	0,30	0,59	0,72	0,71	0,40	0,34	0,29	0,56	0,68	0,68

* П – продувка.

Таблица 6.7. Отношение пульсационной скорости к скорости упорядоченного движения в зонах проковша

Вариант	B0	D1 D2		B1	D3 D4		C0	D5 D6		C4	D7 D8	
		15°	30°		П*	П 15°		П 30°	15°		30°	П
Зона 1												
u'/U _{ср}	0,79	0,63	0,55	1,02	1,67	1,70	0,40	0,62	0,54	1,04	1,52	1,55

Зона 2												
u'/U _{ср}	0,98	1,14	1,11	1,59	1,51	1,47	0,90	1,07	1,02	1,22	1,36	1,35
Зона 3												
u'/U _{ср}	1,03	0,89	0,84	1,69	2,16	2,10	0,94	0,85		1,52	2,07	2,19
Весь промковш												
u'/U _{ср}	0,78	0,73	0,66	1,20	1,59	1,56	0,81	0,72	0,64	1,12	1,45	1,45

* П – продувка.

В первоначально регулярных потоках в результате неустойчивости возникают случайные возмущения, которые быстро растут, взаимодействуют с основным потоком и друг с другом, порождают новые возмущения, т.е. потоки становятся турбулентными. Существуют две основные причины неустойчивости: сдвиг скорости в пространстве (изменение скорости поперек потока) и термическая неустойчивость в жидкости, неравномерно разогреваемой в пространстве и находящейся в поле силы тяжести.

В первом случае неустойчивость развивается при достаточно больших числах Рейнольдса. В случае термической неустойчивости выделяют горизонтально-неоднородный и вертикально-неоднородный разогревы. Под горизонтальную понимается поверхность равного потенциала силы тяжести, а под вертикальную – направление ее градиента. При горизонтально-неоднородном разогреве жидкость всегда находится в состоянии движения, а при вертикальном – если вертикальный градиент температуры $\frac{dT}{dz} < \gamma_a = -\alpha g \frac{T}{c_p}$, где

γ_a – адиабатический градиент температуры, α – коэффициент теплового расширения жидкости, g – ускорение силы тяжести, c_p – теплоемкость при

постоянном давлении. Если $\frac{dT}{dz} \geq \gamma_a$, то в отсутствие горизонтальных градиентов темп-ры (и других вынуждающих сил) жидкость покоится. Более об-

щая формулировка условий устойчивости среды в поле силы тяжести требует, чтобы $\frac{d\rho}{dz} > \left(\frac{d\rho}{dz}\right)_a = -\rho g c^{-2}$, где ρ – плотность среды, c – скорость звука

в ней, $\left(\frac{d\rho}{dz}\right)_a$ – адиабатический градиент плотности среды. Если плотность

среды убывает с увеличением высоты быстрее, чем по адиабатическому градиенту, то в ней возникают вертикальные движения более или менее случайного характера – так называемая конвекция, или термическая турбулентность. В противном случае конвекция отсутствует

Устойчивая по высотам стратификация среды затрудняет также развитие сдвиговой неустойчивости потока. Из уравнения локального баланса турбулентной энергии, учитывающего генерацию кинетической энергии турбулентности и ее диссипации, обусловленную вязкостью, следует, что турбу-

лентность сдвигового происхождения подавляется полностью, когда число Ричардсона:

$$Ri = \frac{\frac{g}{\rho} \left(\frac{d\rho}{dz} \right) + \frac{g^2}{c^2}}{\left(\frac{du}{dz} \right)^2} \geq Ri_K \sim 1. \quad (6.39)$$

Число Ричардсона Ri – критерий подобия в гидродинамике, равный отношению потенциальной энергии тела, погружённого в жидкость к его кинетической энергии. Под «телом» здесь обычно понимается рассматриваемая жидкость или газ. В случае металл – шлак формула запишется в виде

$$Ri = \frac{(\rho_m - \rho_{ш})gL}{\rho_m v^2}, \quad (6.40)$$

где ρ_m – плотность жидкости; $\rho_{ш}$ – плотность шлака; g – ускорение свободного падения; L – характерная длина в вертикальном направлении; v – характерная скорость.

Если помножить и разделить (6.40) на L^2/v^2 , то выражение переписывается в виде

$$\frac{(\rho_m - \rho_{ш})gL}{\rho_m v^2} \times \frac{v^2}{v^2 L^2} = \frac{Ar}{Re^2}. \quad (6.41)$$

Если число Ричардсона меньше единицы, то сила Архимеда (Ar) не играет существенной роли для течения. Если оно больше единицы, то сила плавучести доминирует (в том смысле, что конвекция не может эффективно перемешать расслоившуюся по плотности среду).

Расслоившаяся среда характеризуется вязкостью – свойством жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу слоев. Это свойство проявляется в том, что в реальной жидкости при движении возникают касательные напряжения τ . В нашем случае касательные напряжения от расплава к шлаку равны напряжением от шлака к расплаву. По данным экспериментальных исследований для расплава промышленных марок стали значения динамической вязкости в интервале температур 1480-1650°C находятся в пределах 0.007 Па·с. Динамическая вязкость шлаков колеблется в широких пределах (0.01-0.4 Па·с). Тогда:

$$\mu_p \frac{du}{dn|_p} = \mu_{ш} \frac{du}{dn|_{ш}} \quad (6.42)$$

где индексы « p » и « $ш$ » соответствуют параметрам расплава и шлака.

Согласно полученным результатам численного моделирования возможно определить градиент скорости вблизи шлака. Величина x выбирается из следующих соображений: толщина жидкого слоя шлака $\sim 0,01$ м. Такая толщина слоя выбирается и для определения градиента скорости в расплаве, который равен 0,3 1/с. Тогда, с учетом динамических параметров системы (плотности стали – 7000 кг/м³, шлака – 3000 кг/м³, характерным размером радиуса вихря – 0,32 м, средней скорости циркуляции расплава вблизи шлака –

0,44 м/с.), критерий Ричардсона, в этом случае, в период продувки в зоне максимальных приповерхностных скоростей равен:

$$Ri=9,03.$$

В результате решения уравнения (0.42) определено значение скорости шлака на границе «расплав – шлак», которая для указанных параметров равна 0,0018 м/с.

Информация о кинетической энергии и энергии турбулентного движения в расплаве, получаемая в модели, позволяет определять режимы воздействия на расплав, обеспечивающие максимальную эффективность его взаимодействия со шлаковым покрытием с целью удаления неметаллических включений и предотвращения затягивания шлака в расплав, а также предотвращения возникновения застойных зон, имеющих негативное влияние на тепловую обстановку и тепловую однородность расплава в промежуточном ковше, особенно в переходных режимах [65].

Проведенные расчеты и полученные результаты распределения величин кинетической и турбулентной энергии для предложенных технологических схем непрерывного рафинирования жидкой стали от неметаллических включений показывают, что турбулентное перемешивание способствует гомогенизации жидкой стали и снижению ее химической неоднородности в объеме промежуточного ковша МНЛЗ. При рекомендованных режимных параметрах рафинирования (например, с использованием продувки аргоном) в зоне контакта «рафинирующий шлак – жидкий металл» создаются условия устойчивого течения без взаимного проникновения слоев, вследствие чего обратного вовлечения неметаллических включений в жидкую сталь не происходит.

6.8. Оценка тепловых потерь в промежуточном ковше

Одним из параметров, характеризующий эффективность работы промежуточного ковша, является величина тепловых потерь в период его работы. С целью сохранить как можно дольше тепло в ванне промежуточного ковша и проектируются агрегаты повышенного тоннажа 60-100 тонн. Целью данной работы является определить геометрические параметры промковша, которые в наибольшей степени способствуют сохранению тепла в нем.

Для этого, рассматриваются серии расчетов, в которых варьируются размеры торца промковша, по мере увеличения тоннажа последнего.

Предполагается, что промежуточный ковш имеет форму параллелепипеда, что позволяет свести в таблицу 6.8 геометрические размеры промковша и соответствующий им тоннаж.

Таблица 6.8. Геометрические размеры промковшей и соответствующий им тоннаж для первой серии расчетов

Тоннаж, т	Длина, м	Торец, м	Высота уровня, м
-----------	----------	----------	------------------

40	7,0	1	0,85
60	7,0	1,5	0,85
80	7,0	2	0,85

Рассмотрим теплопотери в 60 и 80 тонных промежуточных ковшей. Результаты расчетов сведены в таблицу 6.9.

Таблица 6.9. Теплопотери в 60 и 80 тонных промковшах

Тоннаж, т	$Q_{\text{бок. ст., Дж}}$	$Q_{\text{торц.ст., Дж}}$	$Q_{\text{дна, Дж}}$	$Q_{\text{зеркала, Дж}}$	$Q_{\Sigma, Дж}$
60	3.3×10^4	0.45×10^4	2.175×10^4	89.25×10^4	95.18×10^4
80	3.3×10^4	0.6×10^4	2.9×10^4	119×10^4	125.8×10^4

Суммарное теплосодержание для 40-тонного промежуточного ковша $Q_{\text{сум}} = 5,159 \times 10^{10}$ Дж, для 60 тонного – $7,738 \times 10^{10}$ Дж и для 80 тонного – $1,032 \times 10^{11}$ Дж.

Как видно из рис. 6.24, с увеличением тоннажа промежуточного ковша падают относительные потери тепла, причем темп падения незначительный. Это объясняется тем, что наибольшие потери тепла осуществляются через зеркало металла, покрытое шлаком (для 40 тонного ПК эти потери составляют 92%, для 60 тонного – 94%, а для 80 тонного – 95% от общих потерь). В связи с этим предложена другая серия расчетов, в основе которой лежит изменение глубины ванны по мере увеличения тоннажа последней. Расчеты второй серии проводились при следующих геометрических параметрах, приведенных в таблице 6.10.

Таблица 6.10. Геометрические размеры промковшей и соответствующий им тоннаж для второй серии расчетов

Тоннаж, т	Длина, м	Торец, м	Высота уровня, м
40	7,0	1	0,85
60	7,0	1	1,30
80	7,0	1	1,70

Полученные результаты сведены в таблицу 6.11.

Таблица 6.11. Теплопотери в 60 и 80 тонных промковшах при различной глубине ванны

Тоннаж, т	$Q_{\text{бок. ст., Дж}}$	$Q_{\text{торц.ст., Дж}}$	$Q_{\text{дна, Дж}}$	$Q_{\text{зеркала, Дж}}$	$Q_{\Sigma, Дж}$
60	5.07×10^4	0.457×10^4	1.46×10^4	59.5×10^4	66.49×10^4
80	6.63×10^4	0.598×10^4	1.46×10^4	59.5×10^4	68.19×10^4

Рассчитаем суммарное теплосодержание и оценим относительные потери тепла для этой серии расчетов. Как видно с увеличением рабочего объема промковша, теплотери существенно снижаются.

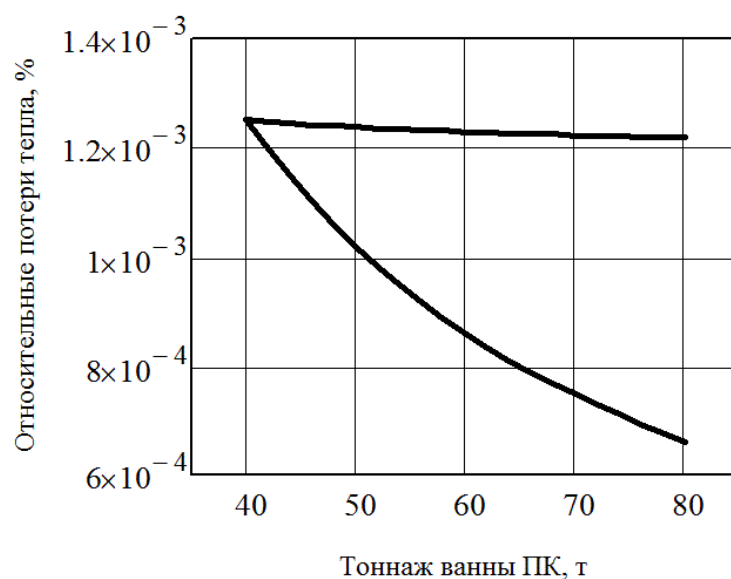


Рис. 6.24. Зависимость относительных потерь тепла от тоннажа промежуточного ковша

Таким образом, для эффективной работы промежуточного ковша и снижения тепловых потерь рекомендуется при увеличении тоннажа ПК увеличивать глубину ванны.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Sahai Y. Melt Flow Characterisation in Continuous Casting Tundishes / Y. Sahai, T. Emi // *ISIJ International*. – 1996. – V. 36. – N. 6. – pp. 667-672.
2. Либерман А. Л. Фильтрация стали в процессе непрерывной разливки / А. Л. Либерман, И. В. Дубровник, В. А. Коржавин и др. // *Сталь*. – 1992. – № 4 – С. 16-18.
3. Koria S. C. Physical Modeling of the Effects of the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish / S. C. Koria, S. Singh // *ISIJ International*. – 1994. – V. 34. – N. 10. – pp. 784-793.
4. J. de J. Barreto S. Physical and Mathematical Modelling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes under Non-isothermal and Non-adiabatic Conditions / J. de J. Barreto S., M. A. Barron-Mesa, R. D. Morales. // *ISIJ International*. – 1996. – V. 36. – N.5. – pp. 543-552.
5. Kumar A. An Assessment of Fluid Flow Modelling and Residence Time Distribution Phenomena in Steelmaking Tundish Systems / Anil KUMAR, Satish C. KORJA, Dipak MAZUMDAR. // *ISIJ International*. – 2004. – V. 44. – N. 8. – pp. 1334–1341.
6. Аникаева А. А. Математическое моделирование коагуляции и удаления неметаллических включений в проковше слябовой МНЛЗ / А. А. Аникаева, Е. А. Казачков // *Вестник Приазовского гос. техн. ун-та*. – 2000. – Вып. 9 – С. 55-60.
7. Craig K. J. Design Optimization of a Single-strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data / K. J. Craig, D. J. de Kock, K. W. Makgata e.a. // *ISIJ International*. – 2001. – V. 41. – N. 10. – pp. 1194-1200.
8. Lee S. M. Mathematical and physical modelling of 3-D fluid flow in a tundish with dam and weir / S. M. Lee, Y. S. Koo, T. Kang e.a. // *Proc 6th Int Iron and Steel Congr., Nagoya, Oct. 21-26, 1990, vol. 3 – Tokyo, 1990*. – pp. 239-245.
9. Szekely T. Mathematical models of fluid flow phenomena in tundiish operation / T. Szekely, Q. Trapaga // *Metec Congr '94 – 2nd Eur. Cont. Casting Conf and 6th Iht. Roll. Conf., – Dusseldorf, June 20-22, 1994 – Proc., vol. 1. – Dusseldorf, 1994*. – pp. 40-45.
10. Ramos-Banderas A. Mathematical Simulation and Modeling of Steel Flow with Gas Bubbling in Trough Type Tundishes / A. Ramos-Banderas, R. D. Morales, L. García-Demedices e.a. // *ISIJ International*. – 2003. – V. 43. – N 5. – pp. 653-662.
11. Jha P. K. Fluid Flow and Mixing in a Six Strand Billet Caster Tundish: A Parametric Study / P. K. Jha, K. S. Dash, S. Kumar // *ISIJ International*. – 2001. – V. 41. – N. 12. – pp. 1437-1446.

12. Byrne M. Operating experience with large fundishes / M. Byrne, F. W. Cramb / "70th SteelMak. Conf. Proc. – vol.70: Pittsburg Meet., March 29 –April 1, 1987". – Warrendale, Pa, 1987. – pp. 81-90.
13. Мабути М. Автоматическое регулирование температуры жидкой стали в промежуточном ковше и применение при разливке коррозионностойких сталей / М. Мабути, Ю. Есии, Ц. Нодзаки и др.// Кавасаки сэйтэцу гихо. – 1985. – Т. 17. – № 4. – С. 365-371.
14. Bessho N. Removal of Inclusion from Molten Steel In Continuous Casting Tundish / Nagayasu BESSHO, Hisao YAMASAKI, Tetsuya FUJII, Tsutomu NOZAKI and Shouichi HIWASA // ISIJ International. – 1992. – V. 32. – N. 1. – pp. 157-163.
15. Руденко Р. В. Определение оптимальных геометрических параметров газ-лифтной камеры промежуточного ковша МНЛЗ / Р. В. Руденко, Н. Т. Лиференко, А. А. Гаркуша // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. – Донецк: ДонГТУ, 2001. – Вып. 15. – С. 238-245.
16. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
17. Govindarajan S. Tata Steel Fluid dynamics and heat transfer consideration in Tata Steel's six-strand billet caster. / S. Govindarajan, R. Dutta, A. Chatterjee // 6th Int. Iron and Steel Conf., Nagoya, Oct. 21-26, 1990. – Vol. 3. – Tokyo, 1990. – pp. 197-206.
18. Zoo S. Heat flow and inclusion behavior in a tundish for slab casting / S. Zoo, R. I. L. Guthrie // Can. Met. Quart. – 1991 – V. 30. – N. 4. – pp. 261-269.
19. Зекели Дж. Компьютерное конструирование (CAD-CAM метод) промежуточного разливочного устройства / Дж. Зекели, Н. Эль-Кадах // Инжекционная металлургия'83. – М.: Металлургия, 1990. – С. 134-146.
20. Mancini J. Tundish metallurgy: a combined IRSID and Hoogovens research / J. Mancini, J. Van der Steel // Rev.met. – 1992. – V. 89. – N. 3. – pp. 269-277.
21. Способ удаления неметаллических включений // Заявка 58-116962 (Япония). – опубл. 12.07.83.
22. Непрерывная разливка стали [учебник для студентов вузов]: рекомендовано Мин. образования / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с. – ISBN 978-966-310-250-4.
23. Ефимова В. Г. Продувка фурмами большой протяженности промежуточных разливочных устройств / В. Г. Ефимова, Г. В. Ефимов, Е. Ф. Диук // Труды Международного научно-технического конгресса «пути возрождения литейного производства в Украине в начале нового тысячелетия» – Киев: ФТИМС НАН Украины, 2001. – С. 23-25.

24. Ростковский С. Е. Теория металлургических процессов / С. Е. Ростковский // Труды ЦНИИЧМ, вып. 61. – М.: Металлургия, 1968. – С. 8-16.
25. Техническая газодинамика / М. Е. Дейч. – М.: Госэнергоиздат, 1974. – 671 с.
26. Гидродинамика газожидкостных систем / С. С. Кутателадзе, М. А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.
27. Тепловая работа сталеплавильных ванн / М. А. Глинков. – М.: Металлургия, 1970. – 407 с.
28. Бабанин. А. Я. Влияние переходных режимов непрерывной разливки на качество заготовки / В. В. Белоусов, А. Я. Бабанин, В. Ф. Комаров и др. // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 20-24.
29. Лапин Ю. В. Статистическая теория турбулентности: прошлое и настоящее (краткий очерк идей). Изд. 2-е / Ю. В. Лапин // Научно технические ведомости. – 2004. – № 2(36). – С. 7-19.
30. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учебное пособие / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.
31. Внутренние течения газовых смесей/ Ю. В. Лапин, М. Х. Стрелец. – М.: Наука, 1989. – 368 с.
32. Spalart P. R. Strategies for turbulence modeling and simulations / P. R. Spalart // Int. J. Heat Fluid Flow. – 2000. – V. 21. – pp. 252–263.
33. Turbulence Modeling for CFD, 3rd edition / D. C. Wilcox. – DCW Industries, Inc., La Canada CA, 2006.
34. Турбулентность: модели и подходы. Курс лекций. Часть I / П. Г. Фрик. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т., 1998. – 108 с.
35. Prandtl L. Uber die ausgebildete turbulenz / L. Prandtl // ZAMM. – 1928. – N. 5.
36. Van-Driest E. R. On turbulent flow near a wall / E. R. Van-Driest // J. Aeronaut. Sci. – 1956. – V. 23. – N. 10.
37. Клаузер Ф. Турбулентный пограничный слой / Ф. Клаузер. // Проблемы механики, вып. 2. – М.: ИЛ, 1959. – С. 297-340.
38. Механика жидкости и газа. – 7-е изд., испр. / Л. Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с. – (Классики отечественной науки). – ISBN 5-7107-6327-6
39. Турбулентный пограничный слой в сверхзвуковых потоках газа. Изд. 2-е / Ю. В. Лапин. – М.: Наука, 1982. – 312 с.
40. Allmaras S. R. One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows / P. R. Spalart, S. R. Allmaras // AIAA Paper, 1992. – AIAA-92-0439.

41. Секундов А. Н. К созданию универсальной однопараметрической модели для турбулентной вязкости / А. Н. Гуляев, В. Е. Козлов, А. Н. Секундов // МЖГ. – 1993. – № 4. – С. 69.
42. Baldwin B. S. A One-Equation Turbulence Transport Model for High Reynolds Number Wall-Bounded Flows / B. S. Baldwin, T. J. Barth // 1992. – NASA TM-102847.
43. Колмогоров А. Н. Уравнения турбулентного движения несжимаемой жидкости / А. Н. Колмогоров // Изв. АН СССР, теор. физ. – 1942. – Т. 6. – № 1-2.
44. Prandtl L. Über ein neues Formelsystem für die ausgebildete Turbulenz. / Ludwig Prandtl, Karl Wieghardt// Nachrichten der Akademie der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse. – 1945. – 6-12. – LPG A 2. – pp. 874-887.
45. Wilcox D. C. Formulation of the k-omega Turbulence Model Revisited / D. C. Wilcox // AIAA Journal. – 2008. – V. 46. – N. 11. – pp. 2823-2838.
46. Spalart P. R. Editorial: RANS modeling into a second century / P. R. Spalart // Special issue of International J. of CFD. – 2009. – V. 23. – N. 4. – pp. 291-293.
47. Бердников В. И. Обобщенная формула для расчета скорости движения твердых частиц, пузырей и капель в жидких и газообразных средах / В. И. Бердников, Ю. А. Гудим, М. И. Картелева // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1997. – № 7. – С. 6-10.
48. Coulson and Richardson's CHEMICAL ENGINEERING. VOLUME 2. FIFTH EDITION. Particle Technology and Separation Processes. – 2002.
49. Hibiki T. One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes / T. Hibiki, M. Ishii // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – V. 46. – pp. 4935–4948.
50. Бакакин А. В. О математическом описании течения металла в ковше при продувке инертным газом / А. В. Бакакин, В. О. Хорошилов // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1981. – № 1. – С. 143-144.
51. Гончар Б. С. Исследование условий формирования стабилизирующего пузырькового режима течения газа при донной продувке жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ / Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров и др. // 50 лет непрерывной разливки стали в Украине: Сб. научн. тр. / под ред. проф., д.т.н. Д.А. Дюдкина; проф., д.т.н. А.Н. Смирнова. – Донецк: Изд-во "Ноулидж" (донецкое отделение). – 2010. – С. 386-396. – Режим доступа: <http://uas.su/conferences/2010/50let/46/00046.php>
52. Warzecha M. Numerical Modelling of Non-metallic Inclusion Separation in a Continuous Casting Tundish [Электронный ресурс] / Marek Warzecha // Computational Fluid Dynamics Technologies and Applications, Prof. Igor Minin (Ed.), pp. 359-374. ISBN: 978-953-307-169-5. Режим доступа:

<http://www.intechopen.com/books/computational-fluid-dynamics-technologies-and-applications/numerical-modelling-of-non-metallic-inclusion-separation-in-a-continuous-casting-tundish>

53. Chemical Reactor Modeling. Multiphase Reactive Flows / H. A. Jacobsen. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 1244 p.

54. Kays W. M. Turbulent Prandtl Number – Where Are We? / W. M. Kays // ASME J. Heat Transfer. – 1994. – V. 116. – pp. 284-295.

55. Weigand B. An extended Kays and Crawford turbulent Prandtl number model / B. Weigand, J. R. Ferguson, M. E. Crawford // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1997. – V. 40. – N. 17. – pp. 4191-4196.

56. Дымнич А. Х. К вопросу о тепловых потерях в сталеразливочном ковше / А. Х. Дымнич, Ф. В. Недопекин, В. Ф. Комаров и др. // Металл и литье Украины. – 2006. – №3-4. – С. 23-26.

57. Гончар Б. С. Исследование гидродинамических особенностей использования металлоприемника (турбостоп) в комплексной технологии рафинирования жидкой стали от неметаллических включений в промежуточных ковшах МНЛЗ / Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров и др. // Труды Двенадцатого конгресса сталеплавильщиков (г. Выкса, 22-26 октября 2012 г.). - М. : Metallurgizdat, 2013. - С. 302-306.

58. Теория турбулентных струй / Г. Н. Абрамович. – М.: Ф-М, 1990. – 646 с.

59. Гончар Б. С. Гидрогазодинамические аспекты интенсификации удаления неметаллических включений в инновационных технологиях внепечного рафинирования жидкой стали в промежуточном ковше МНЛЗ [Электронный ресурс] / Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров и др. // Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали: Сб. научн. тр. – 2011. – Режим доступа: <http://uas.su/conferences/2011/vnepechnaya/29/razdel29.php>

60. Теплообмен и волны в газо-жидкостных системах / С. С. Кутателадзе, В. Е. Накоряков. – Новосибирск: Наука, 1984. – 302 с.

61. Найдек В. Л. Моделирование гидрогазодинамических процессов в полости промежуточного ковша машины непрерывной разливки стали / В. Л. Найдек, Б. С. Гончар, В. Ф. Комаров и др. // Доповіді НАН України. – 2009. – № 5. – С. 73-77. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua:8080/dspace/bitstream/handle/123456789/8512/11-Naidek.pdf?sequence=1>

62. Маленков И. Г. О движении больших пузырей газа, всплывающих в жидкости / И. Г. Маленков // ПМТФ. – 1968. – № 6. – С. 130-134.

63. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.

64. Акаменко А. Д. Теплоотдача в кристаллизаторах установок непрерывной разливки стали / А. Д. Акаменко, А. А. Скворцов // ИЗВЕСТИЯ высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1961. – № 10. – С. 29-36.

65. Белоусов. В. В. Влияние переходных режимов непрерывной разливки на качество заготовки / В. В. Белоусов, А. Я. Бабанин, В. Ф. Комаров и др. // Сталь. – 2008. – № 9. – С. 20-24.

7. ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНИК «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В СТАЛЬНЫХ СЛИТКАХ»

По результатам некоторых описанных расчетных программ разработан электронный учебник.

Процесс информатизации учебных заведений открывает путь электронным учебникам (ЭУ). Электронные учебники имеет общие признаки с печатными[1], а именно:

- учебный материал излагается из определенной области знаний;
- этот материал освещен на современном уровне достижений науки;
- материал в учебниках излагается систематически, т.е. представляет собой целое завершённое произведение, состоящее из многих элементов, имеющих смысловые отношения и связи между собой, которые обеспечивают целостность учебника.

При этом электронные учебники обладают рядом преимуществ:

- Наглядность в ЭУ значительно выше, чем в печатном. Она обеспечивается использованием при создании электронных учебников мультимедийных технологий.
- Электронный учебник обеспечивает многовариантность и разнообразие проверочных заданий, тестов. Электронный учебник позволяет все задания и тесты давать в интерактивном и обучающем режиме.
- Электронный учебник является мобильным: при его создании и распространении выпадают стадии типографской работы. Электронные учебники являются по своей структуре открытыми системами. Их можно дополнять, корректировать, модифицировать в процессе эксплуатации.
- Доступность ЭУ выше, чем у печатных. При спросе на ЭУ легко можно увеличить его тираж, можно переслать по сети, распространить через интернет.

В предлагаемом электронном учебнике, основанном на работе[2], предложены теоретические основы и лабораторные работы по расчету гидродинамических и теплофизических процессов в:

- биметаллическом слитке;
- слитке с внутреннем холодильнике;
- круглом стальном слитке.

Выбор этих трех технологий объясняется взаимообусловленным влиянием гидродинамики на теплофизику формирования слитка.

В первом слитке наблюдается следующая картина. В изложницу, наполненную до прибыльной надставки металлом (маточный расплав), до-

бавляется металл с другими теплофизическими параметрами, и определяются параметры скорости, температуры и доли твердой фазы.

Во втором – в расплав вставляется внутренний холодильник (круглый или квадратный металлический стержень, сделанный из того же металла, что и маточный расплав или из другого металла) и моделируется гидродинамическая, теплофизическая обстановка.

В третьем – моделируется заливка и формирование стали в круглом стальном слитке с расчетом последующего образования открытой и закрытой усадочной раковины.

В основу математического моделирования указанных процессов положена обобщенная математическая модель, описанная в разделе 1.

Подробное изложение математических моделей для различных видов гидродинамических и теплообменных процессов доступно в теоретической части электронного учебника. При этом учтены следующие особенности восприятия текста с экрана электронного устройства (рис.7.1):

1. на экране текст учебника располагается во фреймах;
2. для лучшего понимания, усвоения и запоминания материала используются технические возможности: анимация, звук, цвет, иллюстрации. Включение специальных фрагментов помогают смоделировать сложные физические и технические процессы;
3. главы более короткие по сравнению с книжными, и разбиты на дискретные фрагменты, которые содержат один узкий вопрос;
4. в одном из фреймов постоянно доступно оглавление книги, что позволяет, не листая страницы, быстро переходить к нужному разделу или фрагменту и также быстро возвращаться назад;
5. ключевые слова, термины и другие ссылки визуальным образом выделены, чтобы, щелкая по ним кнопкой мыши, вызывать гиперссылки с объяснениями значений этих слов или комментарием на экран компьютера;
6. чтобы студент не терял ориентации в учебнике, на каждой электронной странице использованы нижний колонтитул и заголовок главы.

Существенную часть учебника составляют лабораторные работы. Запуск лабораторных работ осуществляется с помощью отдельной программы-оболочки, входящей в состав ЭУ (рис.7.2).

Данная оболочка является легко расширяемой и позволяет редактировать список лабораторных работ, добавлять работы или удалять.

Лабораторные работы представляют собой прикладные расчетные программы, созданные с помощью разработанной информационной технологии.

Моделируя затвердевание слитка с внутренним холодильником, студент должен задать теплофизические параметры расплава, охлаждающего стержня, стенок изложницы и прибыли, а также параметры струи: скорость поступления, начальную температуру расплава. В ходе расчета студент по-

лучает распределение линий тока, изотермы, эпюры компонент скорости, температуры и доли твердой фазы.

Моделируя затвердевание биметаллического слитка, студент должен задать теплофизические параметры маточного расплава, доливаемого расплава, стенок изложницы и прибыли, а также параметры струи: скорость поступления, начальную температуру расплава. В ходе расчета студент получает распределение линий тока, изотермы, эпюры компонент скорости, температуры и доли твердой фазы.

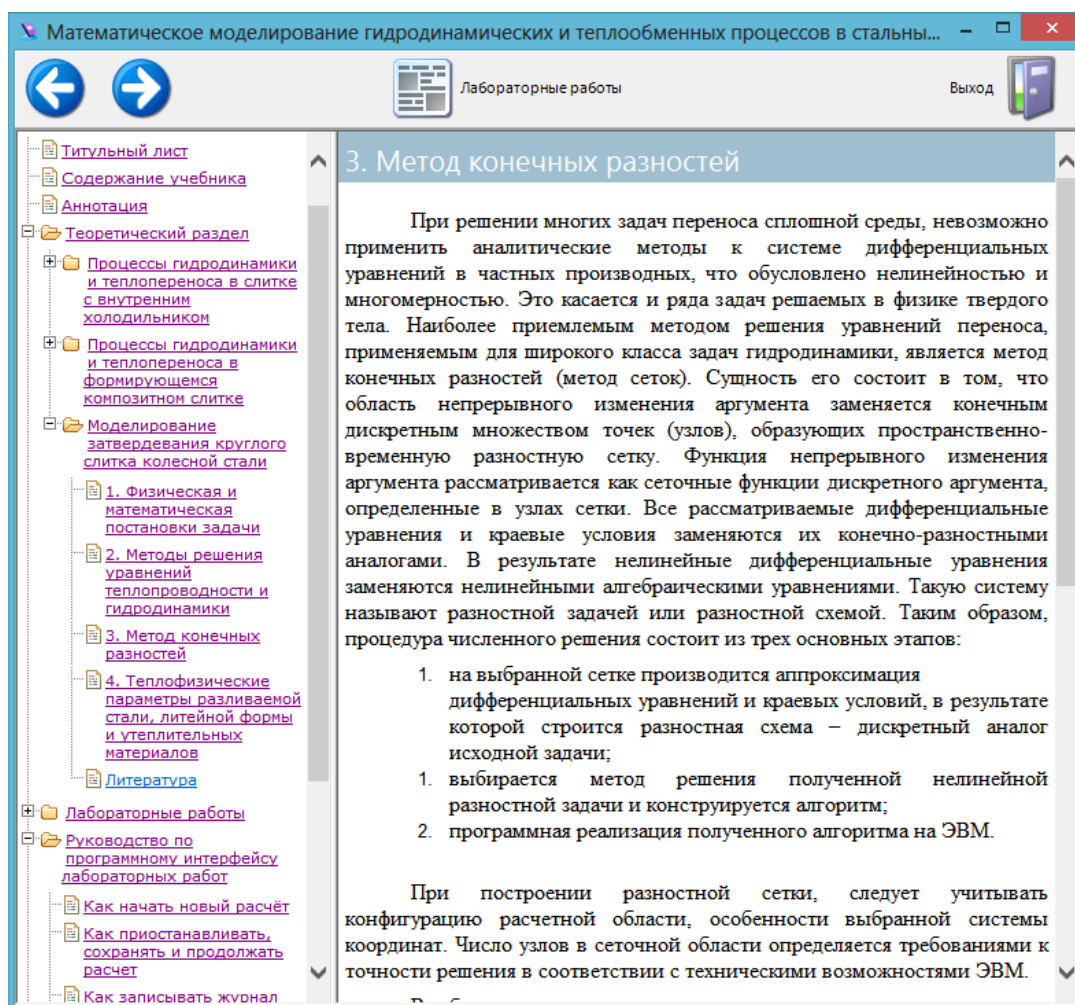


Рис. 7.1. Экран электронного учебника

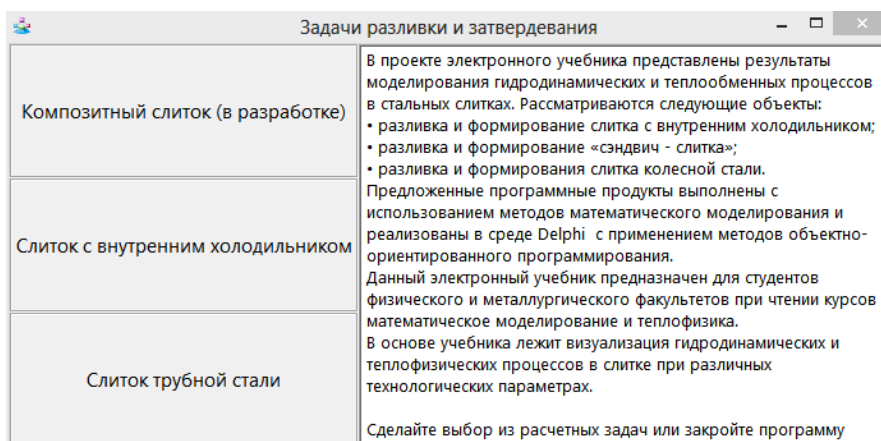


Рис. 7.2. Программная оболочка для запуска лабораторных работ

Моделируя затвердевание круглого слитка колесной стали, студент должен задать теплофизические параметры расплава, стенок изложницы, утепляющего вкладыша и геометрию его расположения на стенке изложницы, а также параметры струи: скорость поступления, начальную температуру расплава. В ходе расчета студент получает распределение линий тока, изотермы, эпюры компонент скорости, температуры и доли твердой фазы, определяет величину открытой и закрытой усадочной раковины.

Электронный учебник реализован в трех форматах: в виде исполнимого файла ОС Windows, в виде файла справки Windows и в виде веб-сайта для размещения в интернете. Распространяется ЭУ в виде файла-инсталлятора, который устанавливает все три формата на компьютер пользователя.

Проект электронного учебника был одобрен на заседании ученого совета физико-технического факультета ДонНУ и внедрен в учебный процесс.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Родин В.П. Создание электронного учебника. Учебное пособие. – Ульяновск: изд. УлГТУ, 2003. – 30с.
2. Затвердевание металлов и металлических композиций//Недопекин Ф.В., Белоусов В.В., Кондратенко В.М., и др.- Киев. Наукова думка, Киев, 2009.- 412с.
3. Недопекин Ф.В. Математическое моделирование гидродинамики и теплопереноса в слитках. – Ижевск: изд. Удмуртского университета, 1995. – 236с.
4. Огурцов А.П., Недопекин Ф.В., Белоусов В.В. Процессы формирования стального слитка: математическое моделирование заполнения и затвердевания. – Днепропетровск: ДГТУ, 1994.-180с.
5. Программная система для моделирования задач теплопереноса. / Бондаренко В.И. – Вестник Донецкого университета. Серия А. Естественные науки, №2/2009 – с.103-111.