

На правах рукописи

Бройтман Олег Аркадьевич

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТЕПЛООБМЕНА И  
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ  
ИХ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 05.16.04. – «Литейное производство»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2006

**Работа выполнена** в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук,  
профессор

Голод Валерий Михайлович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор

Иоффе Михаил Александрович

кандидат технических наук

Зуев Максим Владимирович

**Ведущая организация:**

ОАО «ПТИ литпром», г. Санкт-Петербург

**Защита состоится** «\_\_» марта 2006 г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.14 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»  
по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, ГОУ «СПбГПУ», химический корпус, ауд. 51

**С диссертацией можно ознакомиться** в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2006 года

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.14  
доктор технических наук, профессор

Кондратьев С.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Теплофизические свойства формы оказывают существенное влияние на процесс формирования отливки. Изменяя теплопроводность и теплоёмкость формовочной смеси, можно ускорить или замедлить скорость отвода тепла от отливки и тем самым повлиять на её качество. В настоящее время в сфере проектирования литейной технологии активно развивается направление по компьютерному моделированию процессов литья. Достоверность задания теплофизических характеристик формовочных материалов при моделировании определяет адекватность и точность результата, то есть, насколько правильной является разработанная с помощью ЭВМ литейная технология, обеспечивающая отсутствие дефектов в теле отливки. Экспериментальные данные по теплофизическим характеристикам формовочных материалов, которые можно найти в литературе, весьма ограничены и бессистемны. Имеющиеся экспериментальные данные лишь очень приближённо позволяют ответить на вопрос о теплофизических свойствах применяемого на производстве конкретного материала, поскольку его состав, плотность и другие характеристики в большинстве случаев отличается от ранее исследованных. Актуальным является решение задачи о расчётном пути установления теплофизических свойств формовочных материалов, обеспечивающее автоматическую генерацию свойств по заданному компонентному составу, размеру зёрен основы, плотности смеси с целью оперативной и экономичной реализации процедуры информационного обеспечения моделирующих систем. Для решения указанной задачи в диссертационной работе разработаны структурные модели формовочных смесей, на базе которых построена модель теплопереноса в дисперсном теле литейной формы. На её основе реализована процедура вычисления эффективных теплофизических свойств материала, рассмотрен комплекс актуальных вопросов нестационарного тепло- и массопереноса внутри этой сложной структуры.

**Цель работы** – разработка и компьютерная реализация детерминированной математической модели структурированного тепло- и массопереноса в формовочной смеси, позволяющей производить расчёт эффективных значений теплофизических свойств смеси, что обеспечивает повышение качества отливок за счёт увеличения точности процедуры моделирования. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи анализа процессов переноса тепла в литейной форме:

- разработка модели многофазной структуры дисперсной формовочной смеси;
- разработка математической модели распространения тепла посредством кондукции, конвекции и лучеиспускания в смеси моделируемой структуры и определение на ее основе эффективных теплофизических свойств формовочных материалов;
- численное моделирование процесса нестационарного тепло- и массообмена в формовочных материалах различной структуры для

исследования закономерностей прогрева литейной формы после заливки расплава и формирования её эффективной теплоотводящей способности;

- разработка расчётной методики обработки экспериментальных данных, полученных нестационарным методом заливки, применяемым в лабораторных и производственных условиях, для оперативного определения эффективных теплофизических свойств, потребных для адекватного моделирования литейной технологии.

**Научная новизна** работы состоит в разработке моделей для описания сложной структуры формовочных материалов и изучения закономерностей теплопередачи, определяемых этой структурой. На основе реализации полученных модельных представлений и компьютерного анализа процессов нестационарного тепло- и массообмена в литейной форме:

- исследована роль различных механизмов переноса тепла (кондукция, конвекция, лучеиспускание) для формовочных материалов разной структуры в зависимости от степени уплотнения, размера зёрен наполнителя и их химического состава, количества связующего и т.д., а также выявлены условия и стадии интенсификации работы этих механизмов при равномерном прогреве материала формы; на основе полученных данных установлены *локально-эффективные* (согласно предложенной в работе терминологии) температурно- и структурно-зависимые свойства формовочных материалов;
- численно исследован нестационарный процесс распространения тепла в литейной форме с учётом различных – в зависимости от степени прогрева – локально-эффективных свойств её участков, в разной степени удалённых от границы контакта с металлом; на основе проведённых исследований установлены, согласно предложенной терминологии, *интегрально-эффективные* свойства формы, характеризующие её суммарную теплоотводящую способность;
- аналитически решена обратная задача восстановления локально-эффективных теплофизических свойств по известным интегрально-эффективным характеристикам для установления их взаимной связи; разработана и эффективно использована методика обработки экспериментально полученных нестационарным методом заливки интегрально-эффективных свойств формы для определения локально-эффективных свойств материала, необходимых для численного моделирования теплообмена при анализе литейной технологии;
- сформулирована и реализована на ЭВМ модель нестационарной конвекции газов в литейной форме для оценки влияния конвективных потоков в газотворных формах на интенсивность теплообмена.

**Практическая значимость.** В ходе выполнения работы:

- разработаны и интегрированы в состав системы моделирования литейной технологии программные алгоритмы генерации значений теплофизических свойств формовочных материалов по задаваемому

компонентному и гранулометрическому составу, а также данных о степени их уплотнения;

- при помощи ЭВМ вычислены эффективные теплофизические характеристики формовочных материалов разной структуры в широком интервале температур, являющиеся информационным обеспечением систем моделирования литейной технологии при анализе различных процессов литья;
- разработана и опробована новая методика обработки экспериментальных данных, позволяющая корректно и оперативно в производственных условиях решать задачу информационного обеспечения систем моделирования литейной технологии на базе проведения цеховых экспериментов.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Структурные модели формовочных материалов и модели структурированного стационарного и нестационарного тепло- и массообмена в них.
2. Вычислительные способы определения локально- и интегрально-эффективных теплофизических характеристик формовочных материалов на основе полученных структурных моделей.
3. Аналитическая методика решения обратной задачи восстановления локально-эффективных теплофизических свойств по экспериментально полученным интегрально-эффективным характеристикам.

**Публикации.** Положения диссертации достаточно полно изложены в 7 публикациях. Результаты исследований докладывались на межвузовских научных конференциях («Неделя науки» 2001-2005 гг.), на Всероссийских («Литейное производство сегодня и завтра», 2001 г.; «Фундаментальные исследования в технических университетах», 2005г.) и международных («Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности», 2004-2005 гг.; «Моделирование и симуляция технологических процессов», Фрайбергская горная академия, Германия, 2005 г.) научно-практических семинарах и совещаниях, на международных научно-методических конференциях («Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науке», 2005 г.; «Прогрессивные литейные технологии», 2005 г.).

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, списка литературы. Материалы диссертации изложены на 125 страницах машинописного текста, содержат 5 таблиц и 49 рисунков. Список литературы содержит 107 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность темы работы, представлена научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведен анализ имеющихся в литературе представлений о структуре дисперсных и, в частности, формовочных материалов, эволюции структурных моделей и моделей переноса тепла и массы в дисперсных телах различной структуры. Обзор опубликованных работ свидетельствует о нехватке информации по теплофизическим свойствам формовочных материалов, литейная форма в большинстве случаев (А.И. Вейник, Г.А. Анисович, К. Кубо, Р.Д. Пельке и др.) отождествляется с квазиизотропным телом, эффективные теплофизические характеристики которого могут быть установлены только экспериментально. Связь структурных и теплофизических характеристик формовочных материалов проводится преимущественно качественная, без количественных зависимостей и оценок. В то же время в работах по теории теплопереноса (А.В. Лыков, А.Ф. Чудновский, М. Кавиани, А. Миснар, Г.Н. Дульнев и др.) и, в частности, в физике почвы накоплен значительный объём знаний, определяющий принципы подхода к описанию структуры дисперсных материалов и расчёту их теплофизических характеристик. Однако, структура рассматриваемых в этих работах материалов далека от применяемых в литейном производстве, в них не рассмотрены важные для литейной специфики задачи о нестационарном и неравномерном прогреве сложно-структурированных тел, к которым относится литейная форма. Таким образом в работе обосновывается необходимость построения специальной структурной модели для формовочного материала и рассмотрения особенностей нестационарного переноса тепла и массы при прогреве литейной формы.

Обзор литературы по моделированию литейных процессов подтверждает нехватку экспериментальных и вычислительных исследований температурно-зависимых теплофизических характеристик формы, вводимых при расчёте в ЭВМ. В работе показано, что существующие экспериментальные работы по определению эффективных теплофизических свойств зачастую проведены таким образом, что использование их результатов в качестве информационного обеспечения моделирующих систем неправомерно.

**Вторая глава** посвящена построению структурных моделей формовочных материалов и вычислению их теплофизических характеристик на этой базе, для чего, согласно принципу обобщенной проводимости, используется аналогия между теплопроводностью и электропроводностью.

Формовочная смесь представляет собой уплотнённую зернистую систему, состоящую из зерновой основы, связующего и газовой атмосферы, заполняющей поры (рис. 1), и характеризуется значительной неоднородностью индивидуальных (истинных) теплофизических свойств компонентов, образующих её структуру. При численном моделировании расчёт температурного поля формы ведут на основе уравнения нестационарной теплопроводности Фурье, в которое вводят заранее определённые температурно-зависимые теплофизические характеристики

материала. Эти теплофизические характеристики являются *локально-эффективными*, то есть учитывают сумму всех видов переноса тепла, реализующихся в сложной структуре формовочного материала при определённой температуре.

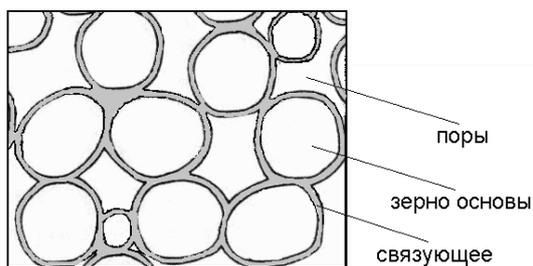


Рис. 1. Схема структуры формовочного материала

Для описания структуры и закономерностей распространения тепла в зернистом формовочном материале со связующим при использовании подхода Г.Н. Дульнева к выделению осреднённого элемента в хаотической структуре дисперсного материала разработана модель ячейки структуры, включающая в себя зерно

основы радиуса  $r_n$  с оболочкой связующего толщиной от  $\delta_0$  до  $\delta$  (рис. 2) и заполненные воздухом поры. Двухстадийная модель формирования структуры формовочной смеси включает:

- образование неуплотнённой смеси путём обволакивания зёрен основы связующим; принимали, что связующее равномерно распределяется вокруг зёрен сферической формы слоем толщиной  $\delta_0$ , для расчета которого при известных массовой концентрации связующего в смеси  $C_{св}$  и истинных плотностях связующего  $\rho_{св}$  и наполнителя  $\rho_n$  получено

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{r_n^3 \rho_n C_{св}}{\rho_{св} (1 - C_{св})} + r_n^3} - r_n;$$

- формирование уплотнённой формовочной смеси при деформации осреднённой ячейки, протекающей с уменьшением эффективного радиуса  $r$  и выдавливанием излишка связующего в околосферическую область; принимали одинаковую степень деформации по всей площади контакта, где толщина плёнки связующего уменьшается до  $\delta = \delta_0 - \delta_0 \chi_{св}$ , где  $\chi_{св}$  – относительная деформация плёнки, определяемая через изменение пористости (или локально-эффективной плотности  $\rho$ ) смеси при уплотнении.

Теплопроводность цилиндрической ячейки радиуса  $r_1$  (рис. 2,а) с осреднёнными геометрическими параметрами определяется термическими сопротивлениями (рис.2,б) отдельных его участков. Тепловой поток, входящий в нижнее основание ячейки, преодолевает термическое сопротивление прослойки связующего  $R_1$ , далее переходит в зерно наполнителя и распределяется по нему (термическое сопротивление  $R_2$ ). Параллельно с этим входящий тепловой поток встречает сопротивление  $R_3$  воздушного зазора и части ячейки под изотермой  $AB$ , ограниченной справа адиабатой  $CB$ . После прохождения через участок с сопротивлением  $R_3$  тепловой поток распространяется в зерне наполнителя (сопротивление  $R_4$ ) и параллельно с этим в плёнке связующего ( $R_5$ ). В дополнение со всеми описанными путями происходит перенос тепла в сквозных воздушных порах

( $R_6$ ). Для суммарного термического сопротивления  $R$  всего осреднённого элемента, выражаемого через искомую эффективную теплопроводность ячейки  $\lambda_k$  и относительную деформацию каркаса формовочного материала  $\chi_k$ , находимую по известному  $\chi_{св}$ , получено соотношение:

$$R = \frac{r(1-\chi_k)}{\lambda_k \pi r_1^2}, \quad (1)$$

откуда с учётом схемы соединения термических сопротивлений (рис. 2,б) следует выражение для определения эффективной теплопроводности ячейки:

$$\lambda_k = \frac{r(1-\chi_k) \left( 1/(R_1 + R_2) + 1/\left( R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right) + 1/R_6 \right)}{\pi r_1^2}. \quad (2)$$

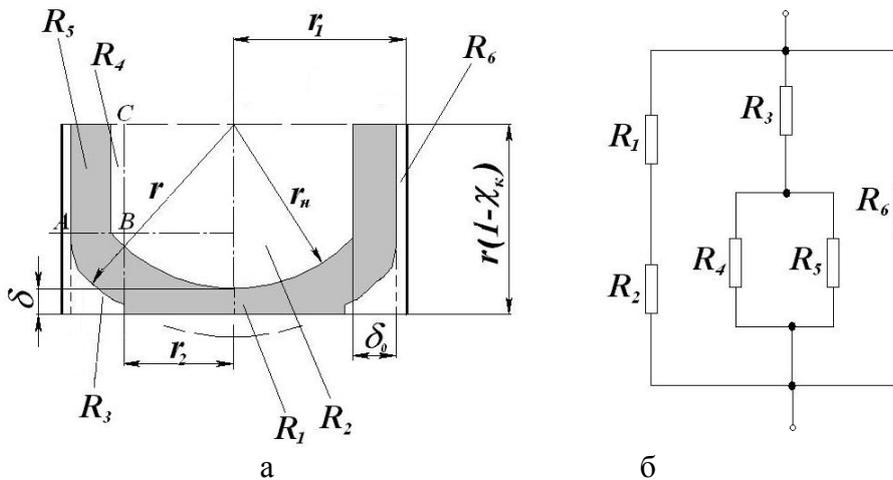


Рис. 2. Модель ячейки структуры уплотнённого формовочного материала  
а – схема ячейки структуры; б – схема соединения термических сопротивлений

Способ расчёта сопротивлений  $R_1 \div R_6$  зависит от характера среды, в которой распространяется тепло. Прогноз локально-эффективной удельной теплоёмкости  $c$  формовочного материала с удовлетворительной точностью выполнен на основе правила аддитивности.

При помощи построенной модели получены эффективные теплофизические свойства формовочных материалов различных классов дисперсности и структуры (материалы с глинистым, смоляным и жидкостекольным связующим, формы для литья по выплавляемым и газифицируемым моделям). Модель ячейки структуры неуплотнённой засыпки зёрен отличается от приведённой на рис. 2 отсутствием деформированной плёнки связующего и существенным снижением радиуса площадки контакта  $r_2$ . Исследование широкой номенклатуры несвязанных формовочных материалов (кварцевый, цирконовый, периклазовый, корундовый пески, стальная дробь) позволило установить количественно влияние пористости  $p$  (степени уплотнения) на их локально-эффективные теплофизические свойства, рассчитать локально-эффективную теплопроводность и теплоёмкость для широкого интервала температур (рис. 3). Зафиксирована весьма слабая зависимость локально-эффективной теплопроводности засыпки, возрастающей с увеличением температуры, от

температурно-зависимых индивидуальных свойств образующих её зёрен, истинная теплопроводности материала которых в большинстве случаев падает с повышением температуры. Обобщение результатов моделирования позволяет сделать вывод о решающем влиянии на конечный результат низкой молекулярной теплопроводности газа в порах, а также межзёрненного лучистого переноса тепла, резко активизирующегося при температурах выше  $800^{\circ}\text{C}$ . Значение локально-эффективной теплопроводности тем выше, чем больше размер зёрен  $d_n$ , что ведёт к возрастанию размера пор, в которых реализуется лучистый теплообмен. Свободная засыпка зёрен малого размера всегда является хорошим теплоизолятором, особенно при умеренных температурах (литьё алюминиевых, магниевых, цинковых сплавов), независимо от истинной теплопроводности материала зёрен. Локально-эффективная удельная теплоёмкость исследованных засыпок преимущественно растёт с повышением температуры в соответствии с характером изменения истинной удельной теплоёмкости зерновой основы.

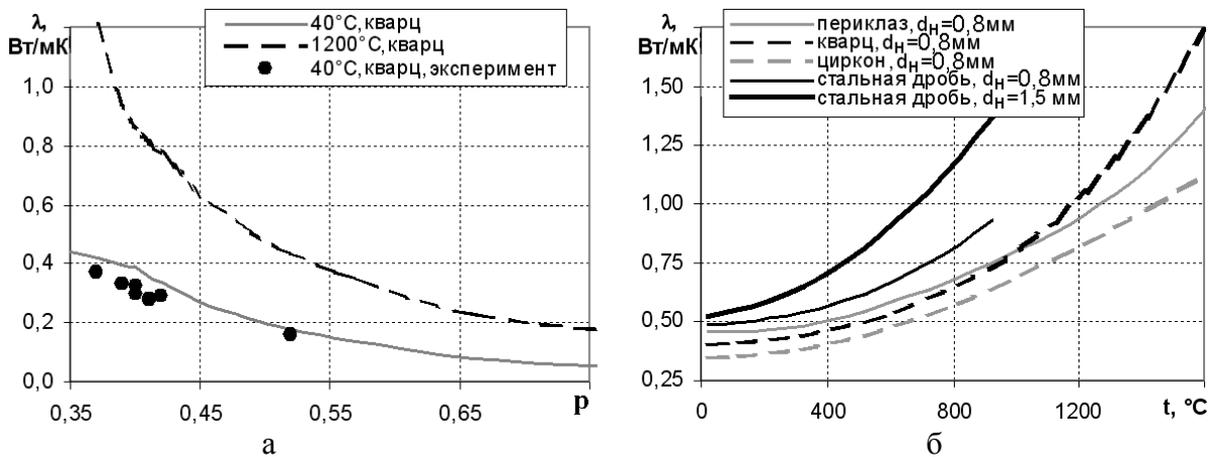


Рис. 3. Влияние пористости (а) и температуры нагрева (б) на локально-эффективную теплопроводность зернистых материалов в сыпучем состоянии

На рис. 4 приведены результаты исследования температурной зависимости локально-эффективной теплопроводности уплотнённых формовочных материалов различной структуры. Полученные данные свидетельствуют о преимущественном росте локально-эффективной теплопроводности песчано-глинистых смесей с повышением температуры. Причина резкого усиления темпа роста в области высоких температур – увеличение лучистой составляющей теплообмена в порах в сочетании со слабым возрастанием истинной теплопроводности зёрен кварцевой основы выше  $1000^{\circ}\text{C}$  (рис. 4). Показано, что чем меньше размер зёрен, тем в большей степени выражено падение локально-эффективной теплопроводности в интервале температур  $20^{\circ}\text{C}$ – $500^{\circ}\text{C}$ , что находится в соответствии с понижением истинной теплопроводности кварца и соответствует экспериментальным исследованиям. Толщина плёнки связующего уменьшается при понижении размера зерна (смесь характеризуется более развитой эффективной поверхностью) в условиях сохранения неизменной массовой доли связующего  $C_{св}$ ; с увеличением  $C_{св}$  в смеси увеличиваются размеры площадок контакта агрегатов. В каждом из указанных случаев

понижается тепловое сопротивление зоны контакта и усиливается влияние истинных свойств зерновой основы на ход кривой изменения локально-эффективной теплопроводности.

Уплотнение смеси и увеличение количества связующего в смеси приводит к увеличению площадок контакта агрегатов и к закономерному увеличению локально-эффективной теплопроводности. Добавка к наполнителю более теплопроводного связующего радикальным образом не сказывается на повышении локально-эффективной теплопроводности смеси, что подтверждено рядом вычислительных экспериментов на модели при варьировании свойств связующего в широком интервале. Толщина плёнки всегда мала в сравнении с размерами зёрен и по этой причине тепловое сопротивление собственно связующего не является лимитирующим звеном. Именно размер площадок контакта является решающим фактором, влияющим на локально-эффективную теплопроводности смеси.

Приведённые на рис. 4 опытные значения  $\lambda$  для различных смесей согласуются с результатами моделирования.

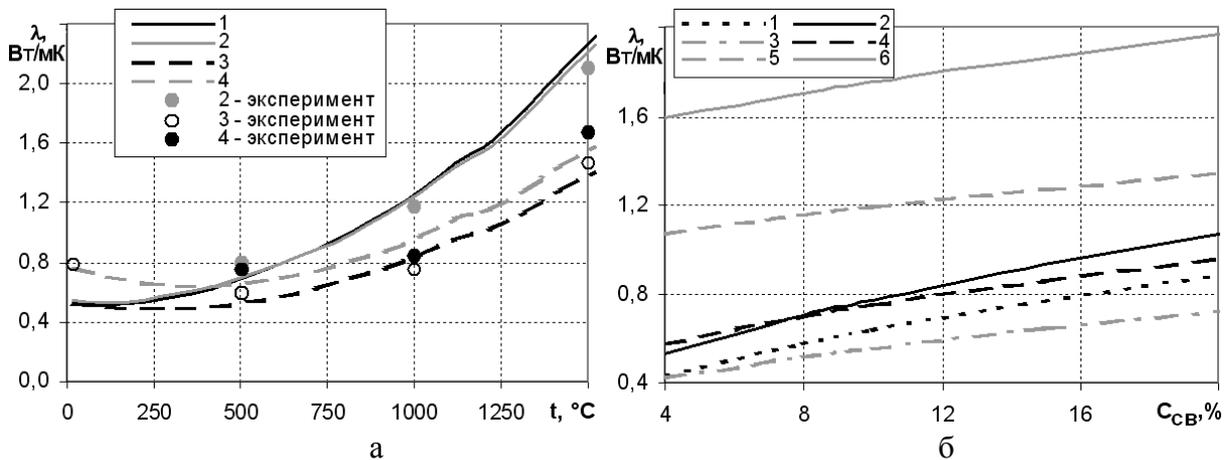


Рис. 4. Влияние температуры (а) и количества связующего (б) на локально-эффективную теплопроводность уплотнённых песчано-глинистых смесей по результатам моделирования (линии) и опытным данным (точки)

а: 1 и 2 –  $d_n=0,5$  мм,  $C_{св}=4\%$ , для 1 –  $\rho=1556$  кг/м<sup>3</sup>, для 2 –  $\rho=1605$  кг/м<sup>3</sup>;

3 и 4 –  $d_n=0,2$  мм,  $\rho=1605$  кг/м<sup>3</sup>; для 3 –  $C_{св}=4\%$ , для 4 –  $C_{св}=10\%$ ;

б: 1 –  $d_n=0,2$  мм,  $t=20^\circ\text{C}$ ; 2 –  $d_n=0,5$  мм,  $t=20^\circ\text{C}$ ; 3 –  $d_n=0,2$  мм,  $t=300^\circ\text{C}$ ;

4 –  $d_n=0,5$  мм,  $t=300^\circ\text{C}$ ; 5 –  $d_n=0,2$  мм,  $t=1200^\circ\text{C}$ ; 6 –  $d_n=0,5$  мм,  $t=1200^\circ\text{C}$

**Третья глава** посвящена численному и экспериментальному исследованию нестационарного (неравномерного) прогрева литейной формы. Численное моделирование теплообмена в литейной форме производили на основе решения уравнения Фурье при задании локально-эффективных структурно- и температурно-зависимых теплофизических свойств  $\lambda$  и  $c$ . По результатам расчёта для условий полубесконечной формы независимым путём определяли интегрально-эффективные теплофизические свойства формы, учитывающие суммарный вклад всех механизмов теплопереноса в прогретых в большей или меньшей степени слоях формы ( $a_{эф}$ ,  $b_{эф}$ ,  $c_{эф}$ ,  $\lambda_{эф}$  – интегрально-эффективная температуропроводность, тепловая активность, удельная теплоёмкость и теплопроводность соответственно) по формулам:

$$a_{эф} = \frac{\vartheta_n^2}{\pi\tau \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=0}^2}; \quad b_{эф} = \frac{\sqrt{\pi} \int_0^\infty c\rho \vartheta dx}{2\vartheta_n \sqrt{\tau}}; \quad c_{эф} = \frac{\int_0^\infty c \vartheta dx}{\int_0^\infty \vartheta dx}; \quad \lambda_{эф} = \frac{q_\phi \Big|_{x=0}}{\frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=0}}, \quad (3)$$

где  $\vartheta$  – избыточная температура формы, отсчитываемая от начальной температуры;  $\vartheta_n$  – избыточная температура поверхности формы;  $q_\phi$  – тепловой поток в форме. Здесь выражение для  $a_{эф}$  получено путём дифференцирования уравнения для температурного поля формы, описываемого при постоянном значении  $a_{эф}$  с помощью функции Гаусса:

$$\vartheta = \vartheta_n \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_{эф}\tau}}; \text{ для } b_{эф} \text{ – из условия равенства количества тепла } Q_\phi,$$

поглощённого формой, определяемого, с одной стороны, интегральной суммой теплосодержания отдельных участков, с другой – расчётной формулой теории теплопроводности при неизменном значении  $b_{эф}$ ; для  $c_{эф}$  – путём осреднения удельной теплоёмкости в объёме формы; для  $\lambda_{эф}$  – из закона Фурье при постоянстве  $\lambda_{эф}$  во всём объёме формы.

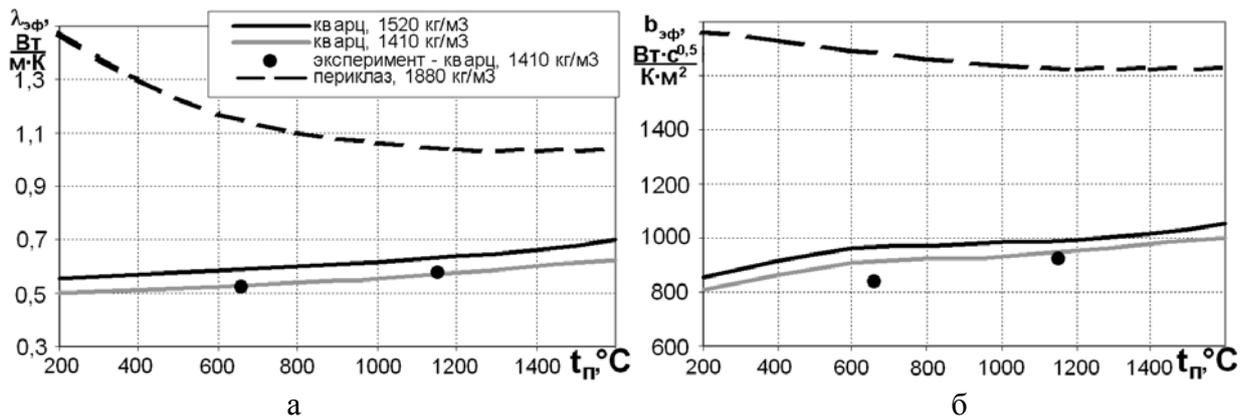


Рис. 5. Влияние температуры поверхности  $t_n$  на интегрально-эффективную теплопроводность (а) и тепловую активность (б) песчано-глинистых смесей на кварцевой основе (сплошные линии) и жидкостекольной смеси на периклазовой основе (пунктир) по результатам моделирования (линии) и опытным данным (точки)

Численным расчетом показана быстрая стабилизация во времени интегрально-эффективных теплофизических характеристик литейной формы (на разном уровне) для различных температур поверхности, зернового состава и свойств материала-основы смеси, что подтверждает автотемпературность температурного поля формы относительно нелинейного изменения теплофизических характеристик материала с температурой и возможность описания этого поля аналитическими уравнениями, полученными при постоянных эффективных теплофизических свойствах формы. На рис. 5 представлено изменение интегрально-эффективных свойств формы в зависимости от температуры поверхности. Численным расчётом показано определяющее влияние на интегрально-эффективную теплопроводность формы локально-эффективной теплопроводности слабо прогретых глубинных слоёв формовочного материала, удалённых от поверхности раздела металл-форма.

Заключительная часть третьей главы посвящена экспериментальному установлению эффективных теплофизических характеристик формовочных материалов. Нестационарный прогрев литейной формы, выполненной из смеси, отверждаемой по ALPHASET-процессу, и определение её эффективных теплофизических характеристик производилось по методу заливки с температурным контролем формы. Методом регулярного режима определяли эффективные теплофизические свойства (см. таблицу) для композиций с жидким стеклом (ЖС) на основе рисовой шелухи (РШ) и магнетитохромита (МХЖ).

Таблица

Установленные по методу регулярного режима локально- эффективные теплофизические характеристики материалов, усреднённые для интервала 20-400°С

№ образца	Материал образца	$\lambda$ , Вт/м·К	$C$ , МДж/м <sup>3</sup> ·К	$\epsilon$ , кДж/кг·К
1	РШ Nermat – 100 об.%, ЖС – 10 об.%	0,21	0,33	0,67
2	РШ Diratek – 100 об.%, ЖС – 18 об.%	0,19	0,42	0,74
3	РШ Nermat (засыпка)	0,05	0,20	0,78
4	МХЖ (8% ЖС)	3,80	1,10	0,46

В работе показано, что при помощи нестационарных методов заливки и температурного контроля формы определяются только интегрально-эффективные теплофизические свойства формы, а теплофизические характеристики, определённые методом регулярного режима, относятся к локально-эффективным, поскольку они определены в условиях малого температурного градиента в образце исследуемого материала.

**Четвёртая глава** посвящена решению обратной задачи: нахождению локально-эффективных теплофизических характеристик формовочного материала (теплопроводность  $\lambda$  и объёмная теплоёмкость  $C$ ), потребных для численного моделирования, из экспериментально определённых по методу заливки интегрально-эффективных свойств формы.

Для установления  $\lambda$  и  $C$  применяли метод параболы  $n$ -й степени описывающей температурное поле тела уравнением  $\vartheta(x, \tau) = \vartheta_n \left(1 - \frac{x}{X}\right)^n$ , где  $\vartheta_n = \text{const}$ ;  $x$  – координата, отсчитываемая в глубь формы;  $X$  – глубина прогрева;  $\tau$  – время прогрева. Температурную зависимость локально-эффективных  $C$  и  $\lambda$  принимали в виде полиномов:

$$C = C_0(1 + \alpha_1 \vartheta + \alpha_2 \vartheta^2), \quad \lambda = \lambda_0(1 + \beta_1 \vartheta + \beta_2 \vartheta^2), \quad (4)$$

где  $C_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\lambda_0$ ,  $\beta_1$  и  $\beta_2$  – подлежащие определению коэффициенты;  $\vartheta$  – избыточная температура формы. С учётом формулы для температурного

поля формы и соотношений (4) определяли тепловой поток на границе формы  $q_\phi$  по формулам  $q_\phi = -\lambda(\vartheta_n) \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{x=0}$  и  $q_\phi = \frac{dQ_\phi}{d\tau}$ , где количество поглощённого формой тепла  $Q_\phi = \int_0^x C \vartheta dx$ . Приравнявая полученные выражения для  $q_\phi$ , определяли глубину прогрева формы и с её учётом находили окончательное выражение для  $Q_\phi$ . Полученные для  $X$  и  $Q_\phi$  формулы при сопоставлении с классическим решением задачи о прогреве формы методом параболы  $n$ -й степени при температурно-независимых  $\lambda$  и  $C$  использовали для вывода выражений, описывающих результирующие интегрально-эффективные значения  $a_{\phi}$  и  $b_{\phi}$ , которые являются температурно-зависимыми в связи с изменением в опытах температуры поверхности формы  $\vartheta_n$  вследствие заливки различных сплавов:

$$a_{\phi} = \frac{\lambda(\vartheta_n)}{C_{\phi}}; \quad b_{\phi} = \sqrt{\lambda(\vartheta_n) C_{\phi}}, \quad (5)$$

где

$$C_{\phi} = C_0 \left( 1 + \alpha_1 \vartheta_n \frac{n+1}{2n+1} + \alpha_2 \vartheta_n^2 \frac{n+1}{3n+1} \right); \quad \lambda(\vartheta_n) = \lambda_0 (1 + \beta_1 \vartheta_n + \beta_2 \vartheta_n^2). \quad (6)$$

Для определения  $\lambda$  и  $C$  обрабатывали экспериментальные значения  $\lambda_{\phi}(\vartheta_n)$  и  $C_{\phi}(\vartheta_n)$  по методу наименьших квадратов и находили коэффициенты регрессии  $k_0, k_1, k_2, l_0, l_1$  и  $l_2$  в выражениях вида

$$C_{\phi} = k_0 (1 + k_1 \vartheta_n + k_2 \vartheta_n^2); \quad \lambda(\vartheta_n) = l_0 (1 + l_1 \vartheta_n + l_2 \vartheta_n^2). \quad (7)$$

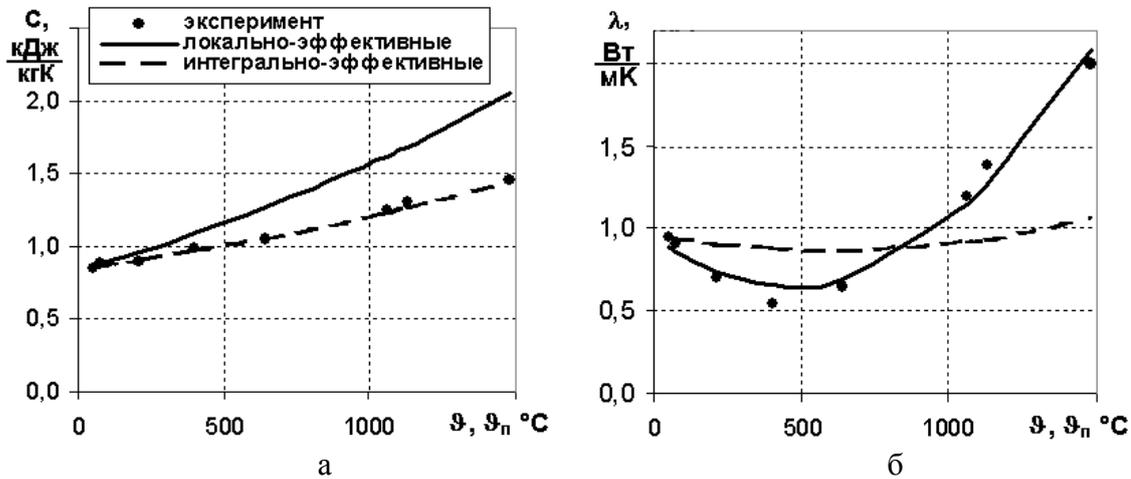


Рис. 6. Влияние температуры на значения локально-эффективной и интегрально-эффективной удельной теплоёмкости (а) и теплопроводности (б) песчано-глинистой формы ( $\rho=1605 \text{ кг/м}^3$ ) в сравнении с экспериментальными данными

При сравнении формул для (6) и (7) получены зависимости для искоемых коэффициентов  $C_0, \alpha_1, \alpha_2, \lambda_0, \beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$C_0 = k_0, \quad \alpha_1 = \frac{k_1}{2n+1}, \quad \alpha_2 = \frac{k_2}{3n+1}, \quad \lambda_0 = l_0, \quad \beta_1 = l_1, \quad \beta_2 = l_2. \quad (8)$$

Интегрально-эффективные характеристики в процессе численного моделирования прогрева формы вычисляли по формулам (3) с применением

найденных локально-эффективных свойств. Результаты применения разработанной методики установления локально-эффективных теплофизических свойств по формулам (8) приведены на рис. 6. Результаты численного моделирования хорошо совпадают с экспериментальными данными (рис.6), что подтверждает эффективность предложенного способа определения локально-эффективных теплофизических характеристик. В результате анализа применённой Г.А. Анисовичем методики аналитического решения и разработанного им способа обработки данных эксперимента, выполненного по методу заливки, выявлено, что посредством указанного экспериментального метода определяется не интегрально-эффективная, а локально-эффективная теплопроводность материала формы, соответствующая температуре поверхности формы  $\mathcal{G}_n$ , и интегрально-эффективная объёмная теплоёмкость формы.

С использованием метода параболы  $n$ -й степени в работе получены зависимости для теплофизических характеристик сырой формы с начальной влажностью  $W_0$ , учитывающие расход тепла на испарение влаги. Для эффективной тепловой активности сырой формы  $b_{\text{эф}}^c$  справедливо выражение

$$b_{\text{эф}}^c = \sqrt{\lambda(\mathcal{G}'_n) C_{\text{эф}}^c}; C_{\text{эф}}^c = C_0 \left( 1 + \alpha_1 \mathcal{G}'_n \frac{n+1}{2n+1} + \alpha_2 \mathcal{G}'_n{}^2 \frac{n+1}{3n+1} + \frac{W_\kappa L_\kappa (n+1)}{C_0 \mathcal{G}'_n (1-W_\kappa)} \right), (9)$$

где  $\mathcal{G}'_n$  – избыточная температура поверхности формы, отсчитываемая от температуры кипения  $\mathcal{G}_\kappa$ ;  $L_\kappa$  – теплота испарения;  $W_\kappa = W_0 + \frac{C_{w0} \mathcal{G}_\kappa}{L_\kappa}$  – максимальная влажность формы в зоне конденсации;  $C_{w0}$  – объёмная теплоёмкость формы с влажностью  $W_0$ , находящаяся по аддитивной формуле.

**Пятая глава** посвящена численному исследованию поля газового давления в литейной форме при газовыделении в процессе её прогрева. Уравнение для расчёта поля давлений в газотворной форме в условиях неизотермической фильтрации газа получено на основе уравнения неразрывности, газового уравнения состояния и уравнения фильтрации Дарси:

$$\frac{\partial P_a}{\partial \tau} = \frac{P_a}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{K_p}{\mu \rho} \left[ \left( \frac{\partial P_a}{\partial x} \right)^2 - \frac{P_a}{T} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial P_a}{\partial x} + P_a \frac{\partial^2 P_a}{\partial x^2} \right] + \frac{RT}{\rho M} \frac{\partial I}{\partial \tau}, (10)$$

где  $K_p$  – коэффициент проницаемости материала формы, вычисляемый, исходя из модельных представлений о структуре смеси (рис. 2);  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $P_a$  – давление;  $M$  – молярная масса газа;  $R$  – газовая постоянная;  $\frac{\partial I}{\partial \tau}$  – массовая мощность источника

газовыделения (термодеструкция компонентов смеси, испарение влаги). Вычисленные из уравнения (10) значения  $P_a$  использовали для определения эффективной теплопроводности газовой атмосферы, заполняющей поры смеси, в расчётах с применением структурных моделей, предложенных во

второй главе. По результатам исследования поля давлений литейной формы устанавливали вклад конвективной составляющей переноса тепла. Расчеты показали, что в условиях литья в сухую *негазотворную* форму ( $I=0$ ), когда нарастание давления происходит только за счёт теплового расширения газа в порах, конвективная составляющая переноса тепла выражена весьма слабо и определённо может не учитываться при тепловых расчетах. При литье в *газотворную* песчано-смоляную форму за счёт газификации нестойких компонентов смеси давление в порах намного превышает давление в негазотворной форме, что может стать причиной брака отливок по газовым раковинам при недостаточной газопроницаемости формовочного материала. Несмотря на значительный перепад давления между участками формы, в которых протекает газификация, и теми, где она ещё не началась, конвективный перенос и в этом случае не является определяющим для теплообмена в форме. Газификация смоляного связующего и – в особенности – испарение влаги во влажных формах протекает с поглощением значительной теплоты фазового превращения. В сырых формах влага интенсивно испаряется из прогретых слоёв и переносится вглубь, где конденсируется со значительным тепловым эффектом. Анализ результатов моделирования показывает, что поглощение и выделение тепла при перемещении фронта фазовых превращений в первую очередь определяет интенсификацию переноса тепла во влажных и газотворных формах.

**Шестая глава** посвящена практическому применению результатов работы. Сформулированы способы программной интеграции полученных моделей расчёта эффективных теплофизических свойств и методик обработки экспериментальных данных в состав систем моделирования литейной технологии POLYCAST (СПБГПУ) и ПОЛИГОН (ЦНИИМ).

Расчётные и экспериментальные данные, полученные в диссертационной работе, применены для моделирования литейной технологии и модернизации информационного обеспечения по свойствам формовочных материалов в ЦНИИ «Прометей» и «ОМЗ-Спецсталь», что позволило уточнить результаты моделирования процессов литья титановых сплавов в формы, выполненные на основе периклаза, и питания крупногабаритных стальных отливок и слитков, изготавливаемых с применением различных утепляющих материалов.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. На основе разработанных структурных моделей формовочных смесей установлен вклад различных механизмов переноса тепла, определяющих интенсивность теплообмена и теплофизические характеристики материалов разной дисперсности и структуры. Эффективную теплопроводность уплотнённых формовочных материалов со связующим лимитируют теплопроводность зернового скелета, газовой фазы в порах и размер площадок контакта между зёрнами основы, окружённых связующим. Увеличение уплотнения смеси и повышение температуры

существенно изменяет соотношение между вкладом теплопроводности и лучеиспускания при второстепенной роли конвективного переноса тепла.

2. При численном моделировании прогрева литейной формы установлена автомодельность её интегрально-эффективных свойств относительно нелинейного изменения структурно- и температурно-зависимых локально-эффективных свойств формы, её газового режима и изменения температуры поверхности формы, что позволяет применять интегрально-эффективные характеристики для аналитических и численных расчётов при условии адекватного определения их значений.
3. Полученное в работе аналитическое решение задачи о взаимосвязи локально- и интегрально-эффективных характеристик формовочных материалов открывает возможность использования методики заливки литейной формы для экспериментального определения не только интегрально-эффективных, но и локально-эффективных теплофизических свойств, необходимых для численного моделирования процессов литья.
4. Моделирование сопряжённых процессов тепло- и массопереноса в литейной форме позволило установить, что усиление интенсивности теплообмена в газотворной форме в первую очередь связано с выделением и поглощением тепла во время протекания фазовых превращений при незначительной роли конвекции в переносе тепла для не газотворной и газотворной формы. Для повышения точности численного моделирования процессов литья в сырые и песчано-смоляные формы необходим учёт выделения теплоты фазовых превращений, связанных с перемещением фронтов испарения и конденсации в сырых формах, и с кинетикой термодеструкции, влияющей на изменение структуры песчано-смоляной смеси.
5. Основным компонентом погрешности численного моделирования литейной технологии является неадекватное задание температурной зависимости локально-эффективных свойств от температуры. Использование разработанных структурных моделей, в сочетании с табличными данными о свойствах зерновой основы смесей, для определения теплофизических характеристик формовочных материалов различного состава, влажности и степени уплотнения обеспечивает необходимую точность информационного обеспечения численных расчётов, о чём свидетельствует сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными методом заливки и нестационарными калориметрическими методами.
6. Сопоставление накопленных в процессе проведения вычислений данных по теплофизическим свойствам сухих и влажных формовочных смесей с экспериментальным материалом свидетельствует о принципиальной возможности адекватного моделирования теплообмена в литейной форме при учёте её сложной структуры.
7. Результаты работы успешно использованы для формирования информационного обеспечения при компьютерном моделировании процессов литья.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Бройтман О.А., Голод В.М. Определение теплофизических характеристик формовочных материалов на основе моделирования их дисперсной структуры и переноса тепла кондукцией, конвекцией и лучеиспусканием //Сб. Литейное производство сегодня и завтра. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001, с. 148-150.
2. Бройтман О.А., Голод В.М. Влияние структурных факторов на теплофизические свойства формовочных материалов //Сб. Материалы межвузовской научной конференции в рамках XXX недели науки СПбГТУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002, с. 47-49.
3. Бройтман О.А., Голод В.М. Роль различных механизмов переноса тепла в формовочной смеси в зависимости от её структуры. //Сб. Материалы межвузовской научной конференции в рамках XXXIII недели науки СПбГПУ. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 166-167.
4. Бройтман О.А., Голод В.М. Эффективные теплофизические характеристики формовочных смесей. Обратная задача. //Сб. Высокие интеллектуальные технологии и генерация знаний в образовании и науке. Материалы XII международной научно-практической конференции. Том I. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 305-308.
5. Бройтман О.А., Голод В.М. Моделирование распределения газового давления в литейной форме. //Сб. Фундаментальные исследования в технических университетах. Материалы IX Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 295-296.
6. Бройтман О.А., Хлямков Н.А. Моделирование затвердевания стальных слитков различной конфигурации. //Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы научно-практического семинара. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 50-57.
7. Бройтман О.А., Голод В.М. Структурная модель теплообмена в дисперсных формовочных материалах для автоматизированного прогноза их теплофизических свойств. //Труды III международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». М., МИСиС, 2005, с. 271-276.