

1551257

На правах рукописи

Бертман Виктория Анатольевна

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАПОЛНЕНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ
ТОНКОСТЕННЫХ ПАНЕЛЬНЫХ ОТЛИВОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ЛИТЬЕМ
ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Специальность 05.18.04. - Литейное производство

АВТОРЕЗЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

В.Бертман

Москва - 1998

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор Валадин Г.Ф.

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент Поляков С.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Неуструев А.А.
кандидат технических наук, доцент Трудоношин В.А.

Ведущее предприятие: АО "НУБИЛИТМАШ"

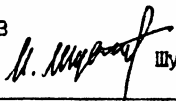
Защита состоится 19 июля 1996 г. на заседании диссертационного Совета К 053.15.13 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, В-5, 2-я Бауманская ул. д.5.

Телефон для справок: 267-09-63

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

Автореферат разослан 15 апреля 1996 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета К 053.15.13
кандидат технических наук, доцент  Шубин И.Н.

Тип. МГТУ им. Н.Э. Баумана, тир. 100 экз., заказ N 57
объем 1,0 п.л. Подписано к печати 15 02 1996 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В период развития рыночной экономики большое значение приобретают ускорение и удешевление технологической подготовки литейного производства при одновременном обеспечении качества отливок.

Одной из важнейших задач при разработке технологий изготовления литого изделия является выбор режима заполнения формы, что предполагает определение следующих основных параметров заливки: скорости подвода расплава в литейную полость, температуры заливаемого расплава, начальной температуры формы, а также обеспечение быстрого газоотвода из полости формы во время заливки.

На практике для расчета параметров заполнения форм используются методики, основанные на общих гидравлических закономерностях и результатах обобщения заводского опыта. Широкий диапазон применяемых в эмпирических расчетных зависимостях коэффициентов приводит к значительным затратам труда, энергии и металла на проведение пробных заливок, что вызывает увеличение себестоимости литого изделия.

Задача определения режимов заполнения форм может быть решена на основе натурных исследований и путем моделирования течения расплава в литейной полости на прозрачных моделях и ПЭВМ.

Проведение натурного изучения заполнения форм связано с большими затратами времени и материалов. Кроме того, такие эксперименты не позволяют наблюдать структуру потока (движение в нем неметаллических включений, наличие вихрей и застойных зон).

Существенным недостатком моделирования заливки литейных полостей на прозрачных моделях является ограниченность конфигураций литых изделий, заполнение форм которых можно исследовать, поскольку изготовить модель, соответствующую фасонной отливке, достаточно сложно. Отсутствует также и возможность изучения на таких моделях распределения температур в движущемся расплаве. Компьютерное моделирование лишено указанных недостатков.

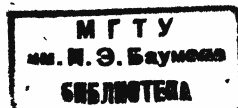
В излагаемой работе объектом исследования являлись тонкостенные панельные отливки, изготавливаемые литьем по выплавляемым моделям. Заполнение форм указанных литых изделий затруднено из-за быстрого охлаждения расплава и влияния на продвижение

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1551257

Бертман В. А. Компьютерное



фронта потока давления газа в литейной полости, которое обусловлено низкой газопроницаемостью керамической оболочки и отсутствием выпоров. Поэтому для выбора режимов заливки керамических форм тонкостенных протяженных литых деталей, получаемых литьем по выплавляемым моделям, важное значение приобретает одновременное исследование гидродинамических, тепловых и газовых процессов в литейной полости на стадии заполнения.

В соответствии с вышеизложенным целью настоящей работы является повышение качества тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям.

Для достижения поставленной цели в работе решена научная задача, заключающаяся в определении полей скоростей и температур на фронте потока в зависимости от параметров заливки формы (скорости подвода расплава в литейную полость, температуры заливаемого расплава, начальной температуры формы и разрежения в полости формы) на основе метода компьютерного моделирования заполнения форм для указанных литых изделий.

Научная задача решена путем использования теоретических и экспериментальных методов. Теоретическое исследование зависимости заполняемости керамических форм тонкостенных панельных отливок от начальной температуры формы, температуры заливаемого расплава, скорости подвода расплава в литейную полость и разрежения в полости формы выполнялось для литой лопатки турбины на основе моделирования на ПЭВМ заполнения форм.

Экспериментальный метод включал изучение влияния режима заливки на заполняемость керамических форм отливки лопатки турбины, проводившееся в условиях заливки форм, изготовленных литьем по выплавляемым моделям.

В работе защищаются следующие научные положения:

1. Для математического моделирования заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям, достаточно использовать квазитрехмерные уравнения движения и теплопереноса и одномерное уравнение фильтрации газа через стенки формы.

2. Допустима компьютерная реализация предложенной математической модели заполнения форм на основе метода частиц в ячейках.

Основные результаты работы, имеющие научную новизну и выносимые на защиту:

1. Разработана математическая модель заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, которая учитывает взаимное влияние на заполняемость формы трех факторов: изменения конфигурации и положения свободной поверхности расплава, распределения температур в потоке и давления газов в литейной полости.

2. Разработан метод компьютерного моделирования заливки форм в результате использования метода частиц в ячейках для численной реализации вышеописанной математической модели при следующих основных допущениях:

- поля скоростей и температур в потоке по толщине тела отливки являются однородными;
- разогревом газов в полости формы заливаемым металлом можно пренебречь в связи с кратковременностью заливки.

Практическую ценность работы составляет пакет программ для компьютерного моделирования заполнения керамических форм тонкостенных панельных литых изделий, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям, который позволяет определять режим заливки форм.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры "Технология и оборудование автоматизированного литейного производства" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1991-1994 гг. и представлены на выставке "Технические вузы Москвы городу", 1994 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав и общих выводов. Содержит 110 страниц машинописного текста, 5 таблиц, 56 рисунков и список литературы из 61 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цель и научная задача исследования, приведены научные положения и основные результаты работы, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ литературных данных, характеризующих особенности заполнения форм тонкостенных панельных отливок, газовый режим в литейной полости на стадии заливки, возникающие в период заполнения дефекты литых изделий, а также возможности использования моделирования для расчета параметров за-

ливки форм.

К тонкостенным относят отливки, длина и ширина которых не менее, чем в десять раз превышают их толщину. На заполняемость форм указанной группы литых деталей оказывают влияние три взаимосвязанных фактора: скорость продвижения и конфигурация фронта потока, поле температур в расплаве и давление газа в литейной полости на стадии заливки.

Наиболее распространенными среди дефектов литых изделий, возникающих на стадии заполнения формы, являются: недоливы, спай и неслитины, шлаковые включения, механический пригар и газовые раковины. Предотвращение указанных дефектов возможно на основе выбора следующих основных параметров заливки: скоростей течения металла в каналах литниковой системы и полости формы, температуры заливаемого металла, начальной температуры формы, а также обеспечения быстрого газоотвода из литейной полости во время заливки.

Использование для определения параметров заливки форм эмпирических зависимостей, являющихся итогом обобщения производственного опыта, приводит к получению приближенных результатов, которые требуют корректировки в условиях заливки реальных форм. Поэтому для определения параметров заливки форм литейщики используют натурные исследования и методы моделирования течения расплава в каналах формы (к указанным методам относятся моделирование распространения потоков в форме на прозрачных моделях и численное моделирование течения металла с использованием ПЭВМ.)

Наиболее прогрессивным методом выбора режима заполнения форм является компьютерное моделирование, которое позволяет определять параметры заливки при существенно меньших затратах времени и средств по сравнению с натурным экспериментом и моделировать заполнение форм отливок практически любой конфигурации с учетом теплопереноса в расплаве в отличие от гидромоделирования.

Однако в имеющемся в настоящее время программном обеспечении отсутствуют разработки, которые давали бы возможность одновременно исследовать гидродинамические, тепловые и газовые процессы при заполнении формы с учетом влияния давления газов, величина которого определяется интенсивностью отвода газов из полости формы, на скорость движения и изменение конфигурации фрон-

та потока.

В соответствии с намеченной во введении целью работы и на основе проведенного анализа литературы сформулируем следующие задачи исследования:

1. Разработать математическую модель заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, которая учитывает взаимное влияние на заполняемость форм трех факторов: скорости движения и изменения конфигурации свободной поверхности расплава, распределения температур в потоке и давления газов в полости формы на стадии заливки.

2. Осуществить численную реализацию вышеназванной математической модели и составить пакет программ для компьютерного моделирования заливки форм.

3. Исследовать заполняемость керамических форм тонкостенных панельных литых деталей, получаемых литьем по выплавляемым моделям, в рамках натурального и компьютерного экспериментов.

Во второй главе описаны натурные исследования заполнения керамических форм двухзамковой литой лопатки турбины, проведенные с целью выявления особенностей заливки форм тонкостенных панельных отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям.

Модель отливки лопатка турбины изготавливали запрессовкой пастообразного модельного состава МВС-3А при температуре 329 К в металлическую пресс-форму. Температура модельного состава контролировалась хромель-копелевой термопарой и регистрировалась потенциометром КСП-4, градуировка ХХ 0-100°С, класс точности 0,5.

Керамическую суспензию готовили отдельным способом. Для приготовления жидкой составляющей суспензии использовались этилсиликат ЭТС 40, ацетон и вода. В качестве катализатора гидролиза ЭТС добавлялась соляная кислота. Для нейтрализации примесей в растворе использовалась серная кислота.

В качестве огнеупорной составляющей суспензии и для обсыпки применялся электрокорунд белый. В процессе изготовления керамической формы на модель наносили пять слоев суспензии и обсыпки. Каждый слой покрытия высушивали в камере для аммиачной сушки около 50 мин.

После выплавления модельного состава формы прокаливали в электропечи при температуре 900 К в течение 60 мин. Температуру в печи измеряли платино-платинородиевой термопарой и регистриро-

вали измерительным преобразователем, градуировка ПИ-1 0-1600°C, класс точности 1,5.

Литая лопатка турбины изготавливалась из сплава АЛ27-1, обладающего пониженной жидкотекучестью. Температуру расплава контролировали хромель-аломелевой термопарой и регистрировали прибором КСП-4, градуировка ХА 0-1100°C, класс точности 0,5.

Перед заливкой керамические формы помещали в опоку с сыпучим опорным наполнителем и нагревали в электропечи. Температуру в печи контролировали платино-платинородиевой термопарой и регистрировали измерительным преобразователем, градуировка ПИ-1 0-1600°C, класс точности 1,5.

В ходе натурального эксперимента температура заливки расплава и начальная температура формы варьировались. При нагреве керамических оболочек выше 673 К на стыке пера и замков лопатки образовывались горячие трещины и усадочные раковины. При начальной температуре формы 673 К и ниже брак по горячим трещинам и усадочным раковинам не возникал, но было отмечено образование недолива в тонкой части пера лопатки при различных температурах заливки расплава, включая максимально допустимую для сплава АЛ27-1 температуру заливки - 1023 К.

Для повышения газопроницаемости форм отливки лопатка турбины в нескольких оболочках по всей длине участка формы, оформляющего тонкую часть пера литой лопатки турбины, было выполнено 10 пропилов, образовавших отверстия диаметром около 1 мм. Расстояние между пропилами составляло около 10 мм.

Заливка форм с пропилами при температуре расплава 1023 К и начальной температуре формы 673 К вновь выявила образование недолива, но меньшего по площади по сравнению с недоливом в литых лопатках турбины, полученных при опробовании описанных выше режимов заполнения форм без использования специальных мероприятий для повышения газопроницаемости оболочек.

Недолив в отливках лопатка турбины удалось устранить путем заливки форм в условиях вакуумирования литейной полости. Заполнение форм производилось при температуре металла 1023 К, начальной температуре формы 673 К и варьировании величины разрежения в полости формы в диапазоне 0,02-0,08 МПа. Величина вакуума регистрировалась вакууметром ОБВ1-100, класс точности 2,5.

Было установлено, что отливки без дефектов получаются при

разрежении 0,04 МПа. При более низких величинах разрежения наблюдался недолив, при более высоких - пригар. Трудоемкость и материалоемкость натурного эксперимента, в результате которого был определен режим заливки керамических форм отливки лопатки турбины, выявили целесообразность разработки метода компьютерного моделирования заполнения форм для расчета параметров заливки.

В третьей главе описываются этапы построения математической модели заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям, и разработку на ее основе метода компьютерного моделирования заливки форм.

Модель была построена на основе исследования особенностей течения расплава в подости формы литой тонкостенной пластины толщиной $2h$. Было принято, что ось OY направлена вдоль направления силы тяжести, ось OZ - вдоль толщины пластины, а движение происходит в плоскости XOY , то есть проекция скорости расплава на ось OZ равна нулю. Законы распределения по толщине пластины проекций скорости на оси OX и OY , обозначенных u и v , соответственно, были представлены в следующем виде:

$$u = u_{max} \left(1 - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right), \quad (1)$$

$$v = v_{max} \left(1 - \left(\frac{z}{h} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где $u_{max} = f(x, y, t)$ и $v_{max} = f(x, y, t)$ - максимальные значения компонент скорости расплава, являющихся функциями координат x , y и времени t .

В результате осреднения с учетом принятых допущений выражений (1) и (2) и трехмерных уравнений движения по толщине пластины были получены квазитрехмерные уравнения, описывающие течение металла при заполнении форм тонкостенных отливок:

$$\rho \frac{d\bar{u}}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) - \frac{3\mu \bar{u}}{h^2}, \quad (3)$$

$$\rho \frac{d\bar{v}}{dt} + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) - \frac{3\mu \bar{v}}{h^2} + \rho g, \quad (4)$$

где μ - динамическая вязкость; ρ - плотность; p - давление; g -

ускорение свободного падения; $\bar{u}$ и $\bar{v}$ - осредненные по оси OZ значения проекций скорости расплава на оси OX и OY.

При формулировке математической модели теплопереноса в расплаве при заполнении формы тонкостенной пластины было принято следующие допущения:

- поле температур в расплаве по толщине литой пластины является однородным;
- керамические оболочки, заформованные в опорный наполнитель, можно рассматривать как массивные неохлаждаемые формы.

В результате учета в двумерном уравнении теплопереноса теплоотвода по толщине пластины в виде отрицательного источника тепла было получено квазитрехмерное уравнение теплопереноса в расплаве при заполнении керамических форм тонкостенных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям:

$$\frac{dT}{dt} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{\beta \varphi}{\sqrt{\pi t}} \frac{T - T_\varphi}{c_p h},$$

где T , c и a - температура, удельная теплоемкость и коэффициент температуропроводности металла; T_φ и $\beta \varphi$ - начальная температура и коэффициент теплоаккумулирующей способности формы.

Для вычисления давления газа в литейной полости было предложено использовать одномерное уравнение фильтрации газа через стенки формы, полученное на основе следующих допущений:

- в связи с кратковременностью заполнения форм тонкостенных отливок можно пренебречь разогревом газов заливаемым металлом и принять, что газовое давление в полостях керамических форм указанного типа отливок на стадии заливки определяется сжатием газов потоком расплава;

- влиянием газопроницаемости сыпучего наполнителя на формирование газового давления в полостях керамических оболочек можно пренебречь.

Система уравнений, включающая квазитрехмерные уравнения движения и теплопереноса, двумерное уравнение неразрывности, одномерное уравнение фильтрации газа и дополненная соответствующими конкретной решаемой задаче граничными и начальными условиями, представляет собой математическую модель заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям. При реализации указанной модели на свобод-

ной поверхности расплава задается давление газа в литейной полости, конвективные члены в уравнении теплопереноса вычисляются с использованием распределения скоростей в металле, полученного из решения уравнений движения, конфигурация и скорость продвижения фронта потока определяют величину площади поверхности полости формы, через которую фильтруется газ.

Частным случаем сформулированной математической модели является модель заполнения щели, ограниченной вдоль осей OX и OY и неограниченной вдоль оси OZ . Указанная математическая модель объединяет двумерные уравнения неразрывности, движения, теплопереноса и соответствующие конкретным условиям литья граничные и начальные условия. Модель заполнения щели позволяет приблизительно оценить характер течения расплава в полостях форм нетонкостенных отливок.

Анализ литературных данных показал, что для численного моделирования литейных процессов наиболее часто применяются метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), а также их разновидности (метод маркеров и ячеек (MAC), метод конечных объемов, метод жидких объемов (SOLA-VOF)). Однако следует отметить, что указанные методы обладают рядом недостатков.

Например, если при численной реализации моделей движения несжимаемой жидкости вычисляется давление, то возникают трудности, связанные с необходимостью решения уравнения Пуассона. Кроме того, моделирование нестационарного неадиабатического течения двухфазной системы "расплав - газ" с использованием указанных методов сопряжено с громоздкими вычислениями.

Для моделирования заливки форм в излагаемой работе было предложено использовать разработанный Ф. Харлоу метод частиц в ячейках, который является модификацией МКР. Указанный подход лишен рассмотренных выше недостатков.

Метод частиц в ячейках позволяет рассчитывать однокомпонентные и многокомпонентные среды. Использование "многокомпонентной" версии рассматриваемого подхода дает возможность исследовать движение в расплаве как газов, так и жидких неметаллических включений, что является дополнительным преимуществом метода частиц в ячейках по сравнению с другими методами численного моделирования заливки форм.

Основу метода частиц в ячейках составляют соотношения, опи-

сывающие движение сжимаемой жидкости. Применение указанного подхода для моделирования течений несжимаемой жидкости допустимо при скоростях, не превышающих 70 м/с. Для технологии литейного производства характерны скорости не более 40 м/с.

Сделанные замечания позволили использовать для определения давления в расплаве уравнение состояния сжимаемой баротропной среды, записанное в следующем виде:

$$p = \rho J,$$

где J - удельная внутренняя энергия. Величина J вычислялась из уравнения энергии:

$$\rho \frac{\partial J}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right) = 0. \quad (5)$$

Таким образом, вместо уравнения неразрывности в математической модели заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок (и, соответственно, в модели заполнения щели) использовались уравнения состояния и энергии.

На основе численной реализации разработанной математической модели заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок с использованием метода частиц в ячейках был получен метод компьютерного моделирования заливки форм.

Согласно методу частиц в ячейках сплошная среда представляется совокупностью частиц определенной массы. Расчет изменения картин движения проводится циклами, каждый из которых подразделяется на два этапа: расчет течения жидкости в неподвижной эйлеровой сетке ячеек и расчет движения лагранжовой сетки частиц через эйлерову сетку ячеек.

С целью обеспечения устойчивости вычислений в выражениях (3)-(5) к давлению p добавляется псевдовязкое давление q , так что вместо p используется величина $p+q$. Для определения q использовалось выражение:

$$q = q_x + q_y,$$

где q_x и q_y задавались следующими соотношениями:

$$q_x = \begin{cases} \frac{a_x^2}{V} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 & \text{при } \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} < 0, \\ 0 & \text{при } \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \geq 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$q_y = \begin{cases} \frac{a_y^2}{V} \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \right)^2 & \text{при } \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} < 0, \\ 0 & \text{при } \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \geq 0. \end{cases} \quad (7)$$

В выражениях (6) и (7) $V = \frac{1}{\rho}$ - удельный объем. Постоянные a_x и a_y имели размерность длины и вычислялись из соотношений:

$$a_x = a_0 \Delta X, \quad a_y = a_0 \Delta Y,$$

где ΔX и ΔY - размеры ячейки в расчетной схеме. В расчетах безразмерная постоянная a_0 принималась равной 2.

На эйлеровом этапе расчетов определяются предварительные значения скорости, энергии и температуры в каждой ячейке. Для удобства вычислений в рассматриваемой работе производится переход от температурного к энтальпийному представлению теплового состояния расплава.

На лагранжевом этапе расчетов происходит перемещение частиц. Масса, количество движения, энергия и энтальпия каждой частицы вычитаются из соответствующих величин прежней ячейки (откуда частица ушла) и прибавляются к значениям в новой ячейке, куда частица переместилась. После перемещения всех частиц для каждой ячейки осуществляется возврат к первоначально рассмотренным функциям - компонентам скорости, давлению, температуре.

На основании описанного метода компьютерного моделирования заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям, разработан пакет программ на языке ПАСКАЛЬ, реализованный на IBM PC/AT-386.

Пакет программ дает возможность, задав теплофизические характеристики заливаемого сплава и формы, конфигурацию литого изделия и параметры заливки, включающие скорость подвода расплава в литейную полость, начальную температуру формы, температуру заливаемого расплава и разрежение в литейной полости, получать температурное поле в полости формы в различные моменты времени времени заполнения, исследовать особенности изменения фронта потока и определять время заливки.

В четвертой главе приведены итоги тестовых исследований адекватности разработанного метода компьютерного моделирования

заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем по выплавляемым моделям, реальным условиям заливки форм.

Тестовые вычислительные эксперименты заключались в изучении особенностей движения воды в форме и сопоставлении результатов моделирования с известными из литературы решениями.

Исследование особенностей потока в литейной полости со ступенчатым препятствием при боковом подводе выявило, что при поступлении жидкости из подводящего канала в полость формы отмечается срыв потока с угла и образование вихрей в пространстве между потоком и стенкой формы. При обтекании ступенчатого препятствия срыв потока и образование вихря возникает за препятствием. Результаты рассмотренного вычислительного эксперимента согласуются с описанными в литературе по механике сплошных сред итогами исследований обтекания плоской ступеньки со срывом потока.

Моделирование на ПЭВМ истечения жидкости из горизонтального канала показало, что величина скорости падающей струи, полученная с использованием формулы для определения скорости свободно падающего в пустоте тела, отличается от величины скорости потока на выходе из горизонтального канала, заданной в исходных данных для моделирования, не более, чем на 20%. В ходе эксперимента было отмечено явление сжатия струи на выходе из канала. Итоги компьютерного моделирования согласуются с результатами исследований истечения жидкости из горизонтального канала, выполненных В.В. Рабиновичем на прозрачных водяных моделях.

При компьютерном исследовании истечения расплава из заполненной в начальный момент времени покоящейся жидкостью литниковой чаши в стояк было выявлено, что поток на выходе из чаши сжимается и не заполняет сечение стояка. Результаты компьютерного моделирования согласуются с итогами выполненных В.В. Рабиновичем на прозрачных водяных моделях экспериментов по изучению особенностей потока в стояке с острой входной кромкой и отсутствием циркуляции расплава в чаше. По результатам компьютерного моделирования был определен коэффициент расхода для системы "литниковая чаша-стояк". Различия между значениями коэффициента расхода, полученными по итогам компьютерного моделирования и по эмпирической приближенной формуле, предназначенной для расчета коэффициента расхода при истечении жидкости через прямоугольные сече-

ния, составило около 4%.

Моделирование на ПЭВМ всплывания твердых частиц шлака в горизонтальном потоке показало, что вертикальная скорость частиц шлака незначительно отличается от скорости всплывания шлака в спокойной жидкости. Этот результат объясняется тем, что давление в направлении, перпендикулярном потоку, распределяется по закону гидростатики. Итоги изложенного вычислительного эксперимента согласуются с результатами исследований всплывания твердых частиц шлака в горизонтальном потоке, выполненных Б.В. Рабиновичем на водяных моделях.

В пятой главе приведены итоги использования разработанного пакета программ для моделирования заполнения керамических форм литейной полости турбины, режим заливки которой был определен в условиях натурного эксперимента. Моделировалось заполнение литейной полости, формирующей перо лопатки турбины. Заполнение считалось качественным (без недоливов, сплавов и неслитин), если заливка полости формы происходила до снятия перегрева.

В исходных данных для проведения вычислительного эксперимента варьировались температура заливки сплава АЛ27-1 и давление среды, окружающей форму, P_c (разность между давлением среды P_c и атмосферным давлением представляет собой заданное разрежение в литейной полости). Начальная температура формы принималась неизменной и составляла 673 К.

В ходе моделирования было выявлено, что скорости и температуры на свободной поверхности расплава распределены неравномерно. Указанное явление объясняется ростом теплоотвода и гидравлических потерь по мере уменьшения толщины литейной полости.

В условиях гравитационного заполнения формы ($P_c = 10^5$ Па) при различных значениях температуры заливки участок литейной полости, формирующий наиболее тонкую часть пера лопатки турбины, заполнялся потерявшим перегрев расплавом.

Моделирование условий заливки формы с вакуумированием литейной полости при значениях давления P_c в диапазоне 20-80 кПа показало, что при температуре заливки 1023 К и давлении среды, окружающей форму, не выше 60 кПа перегрев расплава сохраняется до окончания заполнения литейной полости.

Результаты вычислительного эксперимента согласуются с итогами натурных исследований особенностей заливки керамических форм

отливки лопатки турбины, изготавливаемой литьем по выплавляемым моделям.

В шестой главе рассмотрены возможности расширения области применения разработанного метода моделирования заполнения форм.

Учет в математической модели движения расплава, положенной в основу указанного метода, особенностей теплоотвода и газовых процессов на стадии заливки металлических и песчаных форм позволяет использовать предложенный метод для выбора режимов заполнения форм тонкостенных панельных отливок, изготавливаемых литьем в кокиль и песчаные формы.

Необходимо также отметить, что в излагаемой работе компьютерное моделирование заполнения форм основано на версии метода частиц в ячейках, предназначенной для расчета однокомпонентных сред. Использование "многокомпонентной" версии метода частиц в ячейках даст возможность распространить разработанный метод моделирования на ПЭВМ заливки форм на решение задач о движении в расплаве жидких неметаллических включений и газов.

В качестве иллюстрации возможностей расширения области использования предложенного метода компьютерного моделирования течения расплава приведены результаты исследования в условиях вычислительного эксперимента заполняемости форм тонкостенной прямоугольной пластины, изготавливаемой из сплава АЛ9 в кокиле из серого чугуна, при подводе металла снизу вдоль оси симметрии литейной полости. Моделирование проводилось при допущении, что вентиляционная система обеспечивает достаточный газоотвод из литейной полости в период заливки и давление газов не влияет на продвижение фронта потока. Было также принято допущение об однородности температурного поля по толщине отливки.

Расчет распределения температур в потоке осуществлялся на основе квазитрехмерного уравнения теплопереноса, представленного в следующем виде:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha}{\delta_p \sqrt{\pi t}}} \frac{T - T_{\phi}}{c_p h},$$

где α - коэффициент тепловой проводимости слоя краски на поверхности форм.

Для вычисления α использовалась формула:

$$\alpha = \frac{\lambda_k}{\epsilon},$$

где λ_k - коэффициент теплопроводности слоя краски; ϵ - толщина слоя краски.

В ходе вычислительного эксперимента для отливки тонкостенной пластины при заданных в исходных данных для моделирования температуре заливки, начальной температуре кокиля и типе кокильной краски были определены значения скорости подвода металла в полость формы и толщины слоя краски на поверхности формы, при которых заполнение формы заканчивается до момента снятия перегрева.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. На основе анализа литературных данных выявлено, что используемые в настоящее время исследователями методы компьютерного моделирования заливки форм не позволяют одновременно учитывать влияние на заполняемость трех взаимосвязанных факторов: изменения профиля и положения фронта потока, распределения температур в расплаве и давления газов в литейной полости.

2. Натурный эксперимент по исследованию заполняемости керамических форм отливки лопатки турбины, изготавливаемой из сплава AL27-1 литьем по выплавляемым моделям, показал, что в условиях гравитационной заливки литые изделия получаются с браком: при нагреве керамических оболочек выше 673 К на стыке пера и замков лопатки образуются горячие трещины и усадочные раковины, при начальной температуре формы 673 К и ниже в тонкой части пера лопатки возникает недолив. Заливка форм литой лопатки турбины в условиях вакуумирования литейной полости при разрежении 0,04 МПа, начальной температуре формы 673 К и температуре заливки сплава 1023 К обеспечила качественное (без дефектов) заполнение форм.

3. Построена математическая модель заполнения керамических форм тонкостенных панельных отливок, основу которой составляют квазитрехмерные уравнения движения и теплопереноса и одномерное уравнение фильтрации газа через стенки формы. При этом на фронте потока задается давление газа в полости формы, конвективные члены в уравнении теплопереноса вычисляются с учетом распределения скоростей в расплаве, полученного из решения уравнений движения,

а конфигурация и скорость продвижения фронта потока определяют величину площади поверхности литейной полости, через которую фильтруется газ.

4. На основе использования для численной реализации вышеназванной математической модели метода частиц в ячейках получен метод компьютерного моделирования заливки форм.

5. Двухмерные уравнения движения и теплопереноса составляют основу математической модели заполнения щели. Указанная модель может быть использована для приближенной оценки особенностей течения расплава в полостях форм нетонкостенных отливок.

6. Результаты проведения тестовых вычислительных экспериментов по визуализации картин течения расплава при заполнении форм, определению коэффициента расхода системы "литниковая чаша - стояк" и исследованию движения твердых частиц шлама в потоке показали адекватность разработанного метода компьютерного моделирования движения расплава реальным условиям заливки форм.

7. На основе компьютерного моделирования определены параметры заполнения керамических форм отливки лопатка турбины, изготавливаемой литьем по выплавляемым моделям, обеспечивающие получение литого изделия без недоливов, сплавов и неслитин. Отмечено совпадение результатов вычислительного и натурального экспериментов по исследованию заполняемости форм отливки лопатка турбины.

8. Разработанный метод компьютерного моделирования заполнения форм может быть использован для выбора параметров заливки форм тонкостенных панельных отливок, получаемых литьем в кокиль и песчаные формы. Для прямоугольной тонкостенной пластины, изготавливаемой из сплава АЛ9 в кокиле из серого чугуна, определен режим заполнения формы, позволяющий изготавливать литую деталь без недоливов, сплавов и неслитин.

Основное содержание диссертации посвящено в следующих работах:

1. Поляков С.Н., Бертман В.А. Моделирование движения свободной поверхности металла в каналах литейной формы методом частиц в ячейках//Литейное производство.-1991.-№10.-С. 27-28.

2. Бертман В.А. Компьютерное моделирование заполнения форм тонкостенных панельных отливок//Вестник МГТУ. Машиностроение.-1995.-№4.-С.39 -46.