

# Математическое моделирование и литейные технологии

**В различных областях науки и техники широко используется метод математического моделирования. Этот метод включает в себя разработку физических и математических моделей, численных методов и программного обеспечения, проведение численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники (его результаты анализируются и используются в практических целях).**

**В** технике и технологии преимущества метода математического моделирования очевидны: оптимизация проектирования, сокращение затрат на отработку, повышение качества продукции, уменьшение эксплуатационных расходов и т.д. Математическое моделирование существенно преобразует также сам характер научных исследований, устанавливая новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами.

Применение математического моделирования в литейной промышленности привело к появлению большого числа программных пакетов, с помощью которых более или менее успешно решаются задачи, с которыми литейщики сталкиваются в повседневной практике.



В основе математической модели литейных процессов лежат уравнения тепломассопереноса: уравнения теплопроводности, Навье-Стокса, диффузии, кинетические уравнения фазовых превращений и т.д. Расчетная область включает не только объем, занимаемый расплавом, но также и формообразующую среду с различными граничными и начальными условиями. Возможен учет цикличности процесса литья (например, литье в кокиль).

Программы для моделирования литейных процессов, распространенные в настоящее время, в основном различаются степенью полноты учитываемых при моделировании факторов. Второе различие связано с методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде.

**Метод конечных разностей (МКР)** базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.).

Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит намного упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но довольно существенно для уравнений гидродинамики. Метод также плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

**Метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечного объема (МКО)** базируются на уравнениях тепломассопереноса в интегральном виде. Область, в которой решаются уравнения, разбивается на элементы, внутри которых строятся аппроксиманты функций на основе системы базисных функций, определенных на элементе. "Проектируя" интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Эта система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени. Преимущество МКЭ — хорошая

## TIPS &amp; TRICKS

**AutoCAD. Какие префиксы можно использовать у команд?**

Для многих стандартных команд AutoCAD можно использовать спецсимволы в качестве префикса. Эти префиксы соответственно означают следующее:

- " " — префикс прозрачной команды. Команда, следующая за префиксом, запускается в прозрачном режиме (то есть команда, которая выполнялась ранее, не прерывается). Этот механизм может быть использован для вызова команд масштабирования/панорамирования, справки и т.д.
- "-" — префикс командной строки. Вызывает недиалоговый режим работы команды. Все запросы пользователю будут идти только в командной строке.
- "\_" — префикс вызова нелокализованной команды. Во всех локализованных версиях можно использовать оригинальные английские команды AutoCAD, указывая перед ними этот префикс.
- "." — префикс вызова оригинальной команды. Если команда AutoCAD была переопределена посредством команды UNDEFINE или с помощью AutoLISP, то, используя этот префикс, можно вызвать оригинальную команду.
- "+" — префикс диалогового режима. Принудительно включает диалоговый режим команды.

**AutoCAD 2002. Копирование объектов между чертежами**

Когда вы копируете объекты методом drag-and-drop, вы обычно выделяете объект и, удерживая левую клавишу мыши, перетаскиваете его в другое место чертежа или в другой открытый чертеж. Однако для копирования объектов между чертежами с сохранением координат существует специальная технология:

- откройте два чертежа в одной сессии AutoCAD;
- выделите объекты и перенесите их в другой чертеж, удерживая правую клавишу мыши;
- после того как вы отпустите клавишу, появится меню. Выберите *Вставить с исходными координатами*.

**AutoCAD. Вывод чертежей в формат PDF**

Для этого на компьютере должен быть установлен Adobe Acrobat, который при установке создает системный принтер Acrobat Distiller. Чтобы сохранить чертеж в формате PDF, надо просто распечатать его на этом принтере. Объединить несколько чертежей в один файл можно средствами Adobe Acrobat.

аппроксимация границы, недостатки — необходимость добротного генератора конечных элементов, сложность уравнений, невозможность факторизации.

Модификации МКО пытаются соединить в себе простоту и факторизацию МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами...

Практика показывает, что оптимальный подход состоит не в выборе какого-то одного метода решения, а в использовании комбинации различных методов — это позволяет получить выигрыш в скорости, точности и адекватности получаемых результатов экспериментальным данным.

В программном комплексе *LVMFlow* реализована физико-математическая модель, включающая в себя:

- уравнения теплопроводности в неоднородной среде, состоящей из расплава и формообразующих материалов, теплофизические свойства которых зависят от температуры. Свойства многокомпонентного расплава задаются уравнением состояния, соответствующим эффективной бинарной диаграмме состояния (в дальнейшем планируется переход на описание в рамках трехкомпонентной системы). Кроме того, учитываются внешние воздействия: горение экзотермических материалов, работа каналов нагрева-охлаждения, теплоэлектронагревателей, циклические технологии;
- уравнения Навье-Стокса для ламинарного течения несжимаемой жидкости. Уравнения решаются на кубической сетке методом конечного объема (МКО). Для расчета движения свободной поверхности расплава в процессе заполнения формы используется модифицированный метод VOF (volume of fluid);
- термогравитационную модель дефектов усадочного происхождения, связанную с анализом поведения локализованных жидких областей.

Выбранные методы позволяют реализовать высокоскоростные вычислительные алгоритмы, для них характерна хорошая корреляция ре-

зультатов с экспериментальными данными.

Программный комплекс *LVMFlow* может быть использован для моделирования таких способов литья, как литье по выплавляемым моделям, литье в землю, в кокиль, в изложницу, литье под давлением. Из дополнительных элементов оснастки, применяемых в литейной технологии, в *LVMFlow* рассматриваются теплоэлектронагреватели, каналы с теплоносителями, фильтры, противопригарные покрытия. Также предусмотрено моделирование многократного использования формы.

В сотрудничестве со шведской фирмой NOVACAST AB система доведена до уровня требований мирового рынка. Достоверные результаты моделирования, их наглядное представление, широкие возможности, удобный интерфейс и разумная цена обеспечили коммерческий успех системы за рубежом (с 1993 года произведено более 100 установок в США, Канаде, Бразилии, Швеции, Норвегии, Австралии, Турции). На зарубежном рынке *LVMFlow* распространяется под торговыми марками NovaSolid и NovaFlow.

Среди российских и украинских пользователей — Future Engineering group (Москва), ОАО "ГАЗ" (Нижний Новгород), ГУП "Ижевский механический завод", Государственный рязанский приборный завод, Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева (Сибирская Аэрокосмическая Академия), АО "Заволжский моторный завод" (Заволжье), ОАО "Камский литейный завод" (Набережные Челны), ЗАО "НКМЗ" (Краматорск), ГП НПКГ "Зоря"- "Машпроект" (Николаев).

**Интерфейс пользователя**

*LVMFlow* удобен и достаточно прост в эксплуатации. Его интерфейс полностью соответствует стандартам Windows. Терминология меню и диалогов привычна и понятна специалисту, работающему в литейном производстве, а при возникновении затруднений всегда можно воспользоваться справочной системой.

Система построена по модульному принципу:



Наименование модуля	Назначение модуля
Банк материалов	Формирование и корректировка базы данных по материалам.
3-D import (3D-импорт)	Преобразование файлов форматов DXF, STL, ASCII во внутренний формат LVMFlow, масштабирование геометрического образа отливки.
Initial settings (Препроцессор)	Создание разностной сетки, задание начальных и граничных условий, определение материалов отливки и формы, литниковых и питающих точек, задание датчиков, формирование оболочек и т.д.
QuickFlow (Течение быстро)	Моделирование заполнения формы расплавом без учета процессов теплопередачи.
Flow (Течение)	Моделирование заполнения формы расплавом с учетом процессов теплопередачи.
Solid (Кристаллизация)	Предполагается мгновенное заполнение формы металлом, а затвердевание моделируется в соответствии с неравновесной теорией кристаллизации многокомпонентного сплава.
Flow&Solid (Полная задача)	Последовательный запуск модулей Solid и Flow.
Browse (Банк паспортов)	Просмотр результатов моделирования в разных видах, в том числе создание анимационных файлов.
Системные установки (Настройки)	Установки по умолчанию.
Termal calibration (Тест)	Позволяет провести корректировку некоторых параметров на основе сравнения данных, полученных в ходе простейших экспериментов (натурных и численных).

### Модуль 3D-импорт

Для связи с системами геометрического моделирования (Autodesk Inventor, SolidWorks, Solid Edge, Pro/Engineer, CADD5 и т.д.) имеется конвертор, преобразующий файлы форматов DXF, STL, ASCII во внутренний формат LVMFlow.

### Банк материалов

LVMFlow предназначен для моделирования процессов формирования отливок в реальных цеховых условиях. Промышленные сплавы в подавляющем большинстве являются многокомпонентными системами. Для моделирования кристаллизации сплава необходима его фазовая диаграмма. В настоящий момент достаточно изученными являются фазовые диаграммы двухкомпонентных систем. В связи с этим в модуле **Банк материалов** производится приближенный расчет положения фазовых равновесий многокомпонентного сплава методом деформации двухкомпонентной диаграммы состояния. Данные по

сплавам в базе данных разбиты на классы: углеродистые стали, легиро-

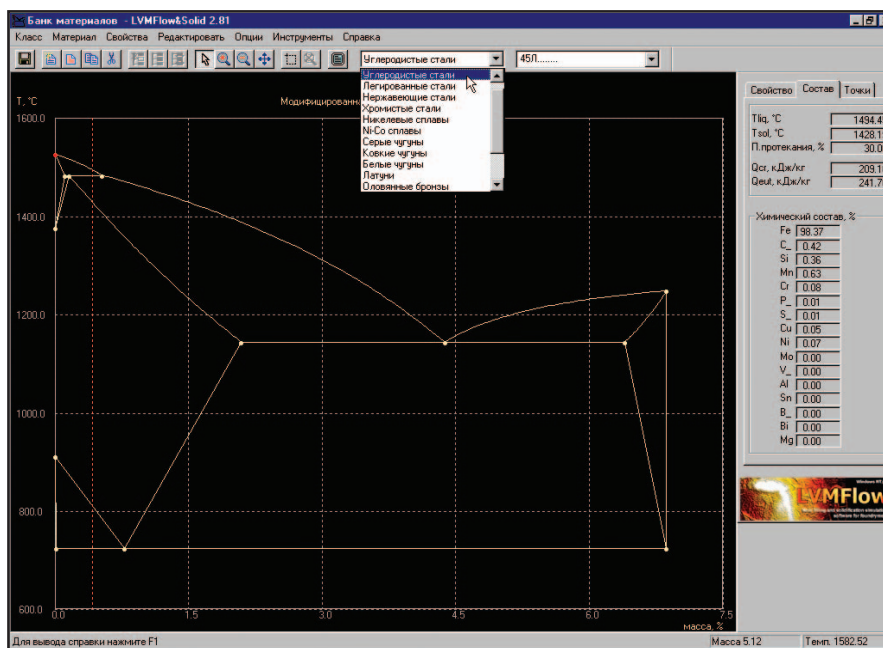
ванные стали, чугуны, бронзы, силицины и т.д.

Класс характеризуется бинарной (базовой) равновесной диаграммой состояния, параметрами, определяющими деформацию диаграммы при добавлении к двойной системе других элементов, и кинетическими коэффициентами фазовых превращений. Для конкретного сплава, принадлежащего определенному классу, введены химический состав, теплоты фазовых переходов и порог протекания. Химический состав сплава, теплоты фазовых переходов и характеристики класса позволяют определить интервал и кинетику кристаллизации данного сплава.

Кроме классов литейных сплавов, в базу данных включен класс материалов форм, куда занесены наиболее часто применяемые формовочные материалы, огнеупоры, изоляционные материалы и металлы.

Моделируемые процессы протекают в широком температурном интервале, на котором значения теплофизических свойств материалов могут меняться в несколько раз. Поэтому как для материалов форм так и для сплавов введены температурные зависимости теплопроводности, теплоемкости, плотности.

Если база данных не содержит нужных пользователю сплавов и материалов форм, она может быть им пополнена. Ввод и корректировка



↑ Модифицированная фазовая диаграмма для углеродистой стали 45Л, полученная методом деформации исходной двухкомпонентной диаграммы состояния

данных осуществляются в простом диалоге и сопровождаются графическим отображением вводимых значений.

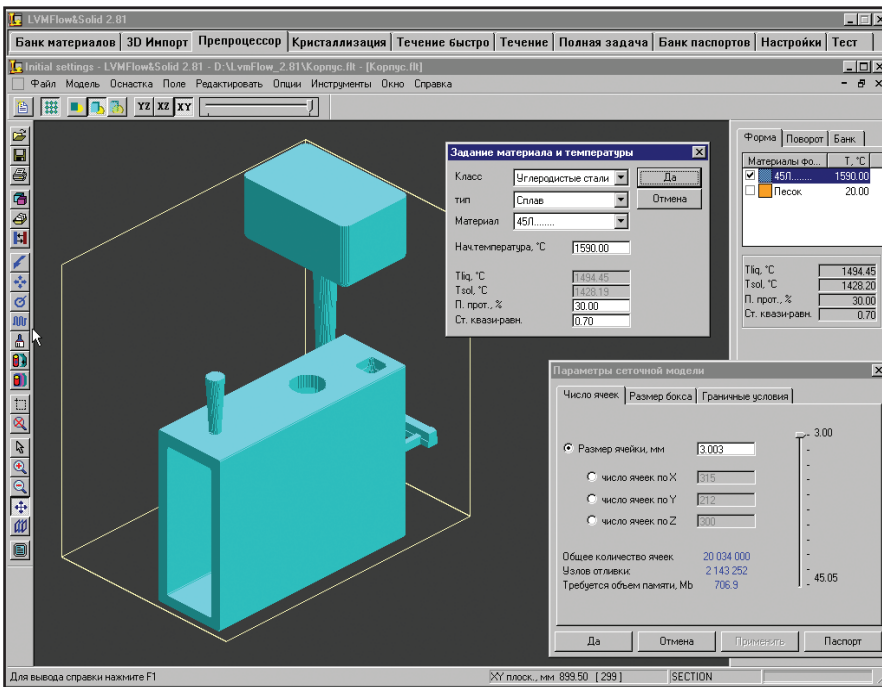
**Препроцессор**

Модуль **Препроцессор** осуществляет множество важных функций LVMFlow: создание разностной сет-

нице расчетной области осуществляется выбором одного из четырех вариантов:

- 1) на границе расчетной области поддерживается заданная температура;
- 2) граница расчетной области является плоскостью симметрии;
- 3) за пределами границы расчет-

нием. Задание места питания металлом (литниковой точки) производится на границе расчетной области в точке, принадлежащей отливке или литниково-питающей системе. Для гравитационного литья задаются напор (высота столба жидкости над сечением, в котором установлена литниковая точка) и коэффициент, характеризующий уменьшение трением жидкости о стенки заливочного устройства. Для литья под давлением задается либо скорость входного потока, либо массовый расход расплава: при задании одного из параметров второй рассчитывается автоматически. Изменение скорости входного потока во времени можно изначально задать формированием таблицы "время-скорость" или организацией системы сенсоров. Установленные в отливку сенсоры работают следующим образом: когда фронт расплава проходит через сенсор, происходит смена скорости входного потока.



- **Ввести параметры дополнительных технологических приемов.** На границе "металл-форма" можно ввести параметры, характеризующие противопригарное покрытие, а также параметры, учитывающие образование воздушных зазоров между металлом и формой в процессе затвердевания отливки.

ки, задание начальных и граничных условий, определение материалов отливки и формы, литниковых и питающих точек, задание датчиков, формирование оболочек и т.д.

Модуль **Препроцессор** предназначен для задания начальных и граничных условий. Он позволяет:

- **Создать разностную сетку в расчетной области, на которой будут решаться уравнения теплопереноса.** В LVMFlow элементарной ячейкой разностной сетки является куб, поэтому для автоматической генерации сетки достаточно ввести один параметр — размер ячейки (шаг сетки) либо задать общее количество узлов сетки. Чем меньше шаг сетки, тем точнее решение, получаемое в процессе счета.
- **Задать на границах расчетной области условия теплообмена.** Задание граничных условий на гра-

ной области располагается бесконечная форма;

- 4) граница расчетной области

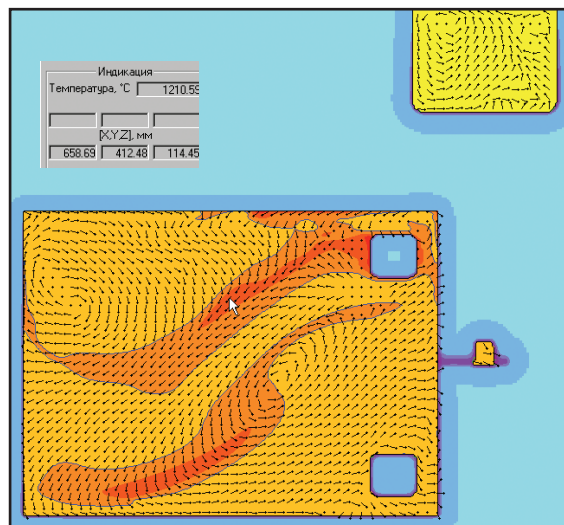
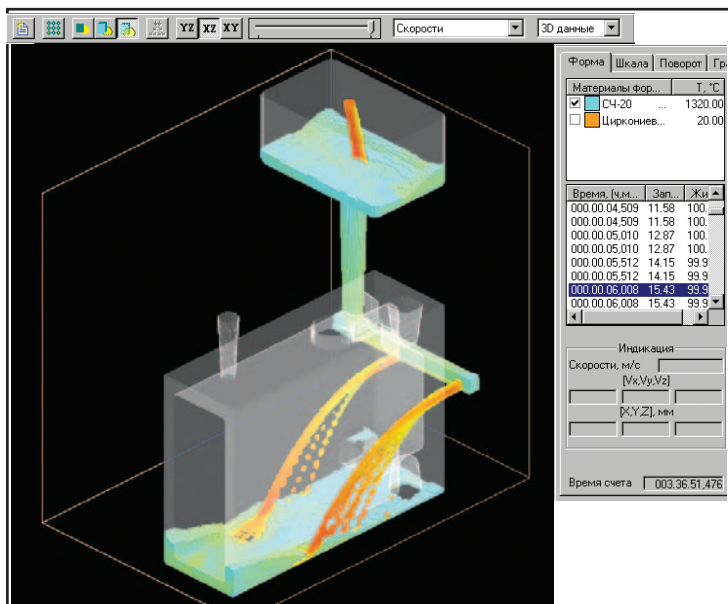
Из дополнительных приемов, применяемых в литейной технологии, в LVMFlow реализовано моделирование теплоэлектронагревателей, каналов с теплоносителями (газ, жидкость, плазма) и фильтров.

вляется границей "форма-воздух".

- **Сформировать параметры заливки.** В LVMFlow предусмотрена возможность моделирования двух видов заливки: гравитационного литья и литья под давле-

- **Установить датчики.** Для более детального анализа пользователь может установить датчики в любом месте расчетной области (в отливке или оснастке). Показания датчиков выводятся в виде графиков временной зависимости выводимой функции (температуры, скорости изменения температуры, доли жидкой фазы, скорости течения расплава, входного потока расплава).

Из дополнительных приемов, применяемых в литейной технологии, в LVMFlow реализовано моделирование теплоэлектронагревателей, каналов с теплоносителями (газ, жидкость, плазма) и фильтров. В процессе моделирования пользователь может в произвольные мо-



▲ Точная идентификация значений поля температур в выбранном сечении отливки

▲ Визуализация процесса заполнения формы расплавом с цветовой индикацией распределения абсолютных значений скоростей потока

менты времени менять мощность тепловыделения ТЭНов. Каналы с теплоносителями могут использоваться как нагреватели и как холодильники.

### Моделирование заливки и кристаллизации

При моделировании заливки и охлаждения литейщик может наблюдать за ходом процесса.

Вывод образа отливки (так же, как и полей функций, характеризующих ее состояние) производится в виде изометрического изображения (3D) и в произвольном плоском сечении (2D) – в цветовой гамме, со-

ответствующей установленной шкале. Возможности просмотра расширены функциями вращения и масштабирования. Для получения более детальной информации можно считать числовое значение поля (температуры, доли жидкой фазы, скорости, пористости и некоторых других параметров) в произвольной точке расчетной области.

Результаты моделирования можно автоматически сохранять для дальнейшего просмотра и создания архива технологических решений. На отливку заводится "паспорт", куда записываются все параметры каждого варианта моделирования.

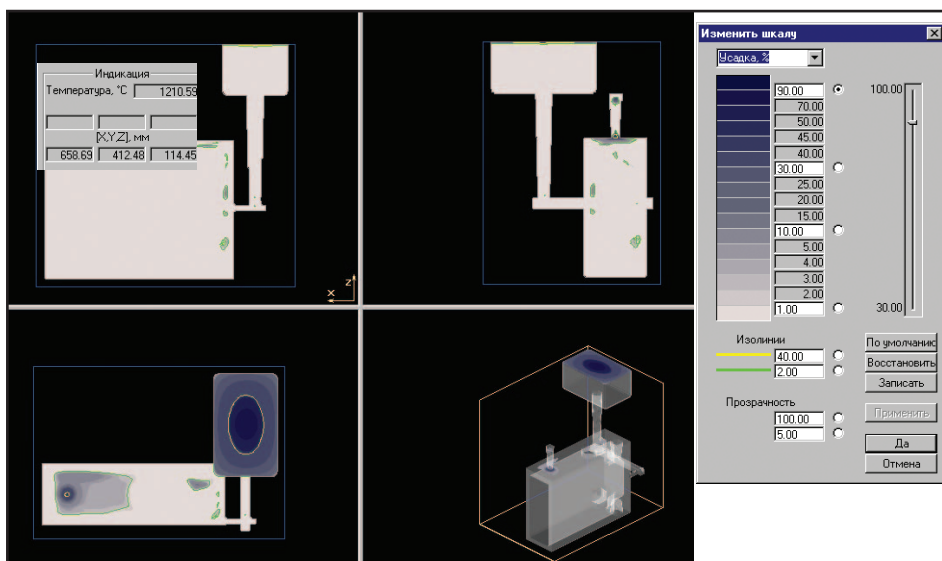
Результаты расчета функций можно сохранять в 2D- и 3D-виде.

В модуле **Банк паспортов** предусмотрена возможность создания и просмотра результатов с помощью анимации. Это позволяет, к примеру, просмотреть процесс заполнения отливки в режиме реального времени. В дальнейшем паспорт может использоваться модулем **Пре-процессор** как прототип для нового варианта модели заполнения и затвердевания.

### Заключение

Система трехмерного моделирования LVMFlow, построенная на основательном фундаменте современных представлений о литейных процессах, является незаменимым инструментом технолога-литейщика, позволяющим без натурных экспериментов (а значит без дополнительных затрат) провести оптимизацию литниковой и других систем и, следовательно, избежать многих литейных дефектов.

*Владимир Васькин,  
Валентин Кропотин,  
Андрей Обухов  
ЗАО НПО "МКМ" (г. Ижевск)  
Тел./факс: (3412) 75-5657  
E-mail: mkm@uni.udm.ru  
Internet: http://mkm.uni.udm.ru*



▲ Распределение дефектов в отливке (пористости) после кристаллизации расплава