

И.Н. Вольнов (канд. техн. наук, ЗАО «Русская Промышленная Компания»)

## Моделирование литейных процессов – современные вычислительные технологии

В настоящее время существует дефицит информации о системах автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП). Многие из описаний систем имеют общий характер и намеренно не затрагивают некоторые специальные вопросы, связанные с оригинальными математическими моделями и особенностями численных алгоритмов компьютерного анализа. На фоне того, что предложение на рынке различных моделирующих систем относительно велико и составляет около десятка программ, знание этих нюансов становится определяющим при выборе САМ ЛП для конкретного производства. Кроме того, при подготовке молодых специалистов на кафедрах по специальности «Литейное производство» принципиально важно располагать данным материалом. Это необходимо не только для выпуска технически грамотных молодых специалистов, но и для отслеживания современных тенденций в областях математического моделирования и вычислительной математики, для использования в собственных научных разработках и решении новых и сложных технологических задач литейного производства.

Наибольший недостаток информации среди САМ ЛП, распространенных на российском рынке [1], имеет гидродинамический и литейный пакет **FLOW-3D®** (США, [www.flow3d.com](http://www.flow3d.com), [www.flow3d.ru](http://www.flow3d.ru)). В данной статье сделана попытка восполнить недостаток информации об этом мощном и эффективном вычислительном инструменте литейщика и ознакомиться с некоторыми важными аспектами моделирования и уникальными технологиями пакета **FLOW-3D®**.

Прежде всего, **FLOW-3D®** – это программный комплекс гидродинамического анализа общего назначения, позволяющий решать задачи механики жидкости и газа во многих областях промышленности, в том числе аэрокосмической, судостроительной, нефтегазовой и химической, микроэлектромеханики, металлургии, литейного производства и др. **FLOW-3D®** включает полную систему уравнений гидродинамики, обширную библиотеку специальных математических моделей, большой набор явных и неявных методов численного решения уравнений математической физики вместе с удобными пре- и постпроцессорами, другими словами, **FLOW-3D®** – это полноценная виртуальная лаборатория гидродинамического моделирования.

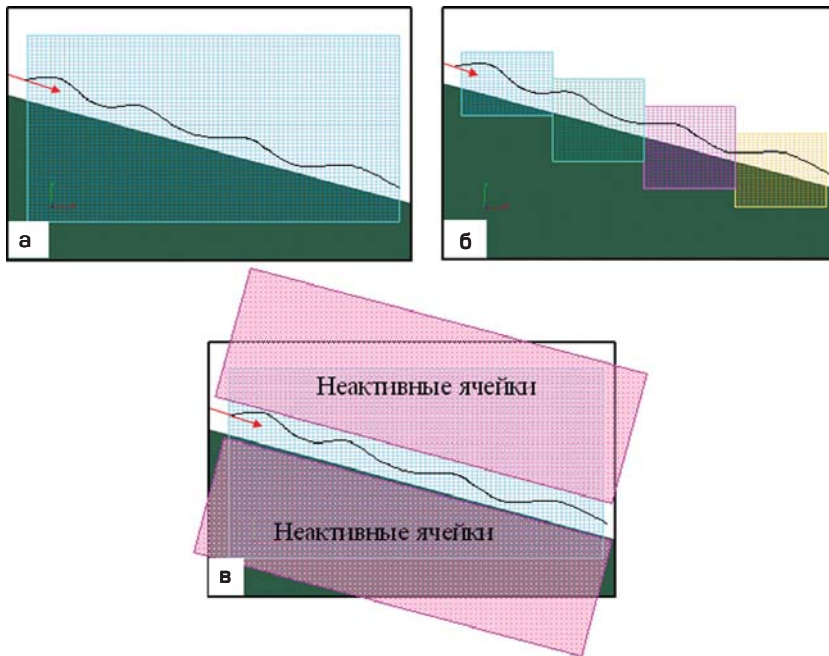
Часть функционала **FLOW-3D®** для расчета течений вязкой несжимаемой жидкости с учетом теплопереноса и теплообмена с окружающей средой, а также фазовых переходов традиционно широко и эффективно используется в области моделирования литейных процессов.

Основная идеология компании Flow Science – раз-

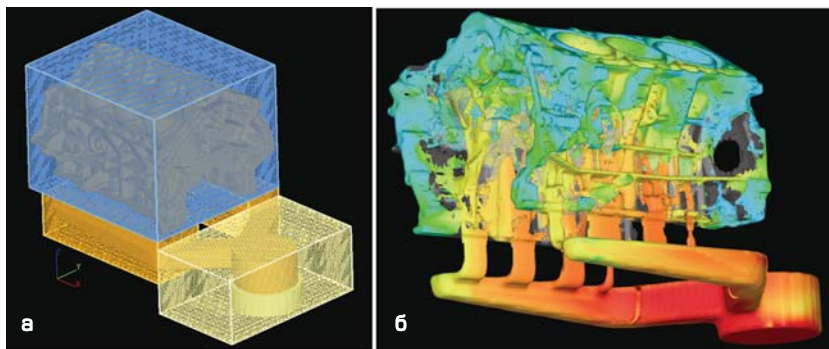
работчика **FLOW-3D®** – точное решение уравнений сохранения и отказ от упрощенных подходов к моделированию течений, что позволяет предсказывать течение в области со сложной геометрией, определять динамические силы (давления) и распределение температур в потоке за счет точного расчета конвективной составляющей переноса тепловой энергии. Большинство литейных пакетов идут по пути встраивания гидродинамических решателей с той или иной (как правило высокой) степенью упрощения.

Опишем вычислительные технологии **FLOW-3D®**, начиная с используемого в этом пакете численного метода решения уравнений математической физики. Данные уравнения решаются во **FLOW-3D®** методом конечных (контрольных) объемов, реализованном на прямоугольной, структурированной сетке. В настоящее время в литейном производстве наибольшее распространение получили численные методы конечных разностей и конечных элементов. От этих методов метод конечных объемов отличают две главные особенности. Прежде всего – это консервативная форма записи уравнений математической физики [2], которая обеспечивает более строгое выполнение законов сохранения для каждой расчетной ячейки и накладывает высокие требования к определению потоков через границы этих ячеек и особенности на граничных поверхностях типа «отливка–форма». Это, в свою очередь, определяет вторую особенность метода конечных объемов – высокую точность описания геометрии. Во **FLOW-3D®** точность геометрии обеспечивает специальный FAVOR™ – метод, который позволяет на прямоугольной (конечно-разностной) сетке точно описать геометрию без известного ступенчатого интерфейса, характерного для метода конечных разностей. Этот метод разделяет ячейки, через которые проходит поверхность геометрии, на две части и в каждой такой ячейке аппроксимирует реальную поверхность плоской поверхностью. Таким образом, метод конечных объемов объединяет преимущества методов конечных разностей и конечных элементов. Простота генерации расчетной сетки, как в методе конечных разностей, совмещена с высокой точностью описания геометрии, сопоставимой с точностью конечных элементов, а за счет консервативной схемы записи основных уравнений обеспечивается повышенная точность расчетов.

Современная практика решения задач гидродинамического и теплового анализа показывает, что они, как правило, решаются на пределе возможностей вычислительных систем, время расчета при этом может измеряться часами, сутками, неделями и даже месяцами. В связи с этим очень важно, и порой критическое, значение приобретает проблема снижения численной размерности решаемой задачи. Эта общая для



**Рис. 1.** Механизмы снижения численной размерности задачи: **а** – исходная сетка, **б** – многоблочная (число ячеек снижено в 8 раз), **в** – дезактивация ячеек (число ячеек снижено в 10 раз)



**Рис. 2.** Многоблочная сетка отливки «блок цилиндров» (**а**) и моделирование процесса ее заполнения (**б**)

всех САМ ЛП проблема решается во *FLOW-3D®* тремя способами.

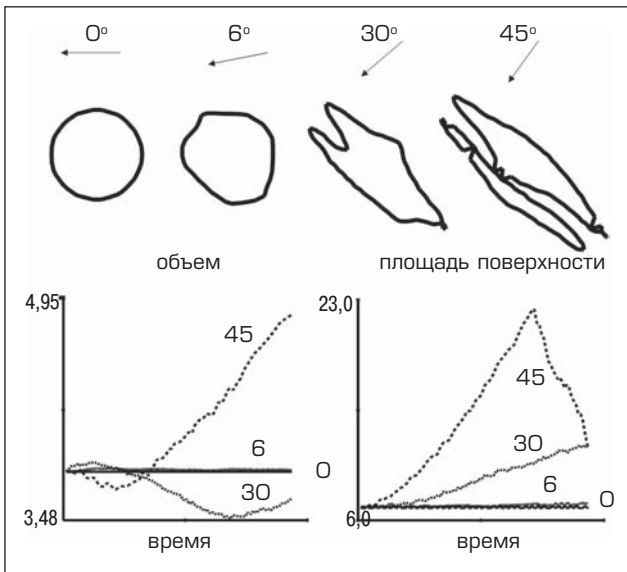
Прежде всего, это использование неоднородной сетки. Данный метод хорошо известен и реализован в некоторых САМ ЛП. Измельчение или разрежение расчетной сетки в данном случае возможно только на всем протяжении сеточной области, по одной или нескольким координатам. Невозможность локального изменения сеточного разрешения послужила причиной создания второго метода – метода многоблочных сеток с сопряжением блоков или вложением их друг в друга. На рис. 1 показана схема задачи течения жидкости по наклонной плоскости, в которой замена одного сеточного блока (рис. 1, а) на четыре сопряженных (рис. 1, б) позволила снизить количество расчетных ячеек в 8 раз. Еще больших результатов позволяет добиться третий метод. В этом методе ячейки расчетной области разделяются на активные, в которых протекают интересные нас процессы, и пассивные, в которых эти процессы отсутствуют или ими можно пренебречь. В на-

шем примере (см. рис. 1) жидкость течет только в узкой полосе вдоль наклонной поверхности – только ячейки этой области активируются, остальные – дезактивируются и исключаются из расчета (рис. 1, в). В результате, по сравнению с исходной сеткой (рис. 1, а) число ячеек снижено в 10 раз.

Использование перечисленных методов позволяет существенно расширить круг решаемых задач, в первую очередь, за счет тех, которые ранее относились к разряду «не решаемых» из-за высоких требований к вычислительным ресурсам или слишком большой длительности расчета. На рис. 2 показана отливка «блок цилиндров», изготавливаемая методом литья под давлением. При совместном использовании перечисленных методов удалось снизить количество ячеек на 95% от исходных 12 млн. шт., объем требуемой оперативной памяти сократился с 4 Гб до 0,2 Гб, а время счета – с трех недель до 4 дней. В настоящее время в различных САМ ЛП методы многоблочных сеток и дезактивации расчетных ячеек реализованы только в пакете *FLOW-3D®*.

Другой важной вычислительной технологией *FLOW-3D®* являются специальные алгоритмы описания свободной поверхности, позволяющие данному пакету удерживать лидерство в этой области не только среди САМ ЛП, но и CFD пакетов. Важность точного описания свободной поверхности металлического расплава при моделировании литейных процессов очевидна. Образование дефектов отливок типа недоливов, неслитин и неспаев, оксидных плен, замешивания в расплав воздуха, обусловлено физическими и физико-химическими процессами, происходящими на свободной поверхности расплава. Точность прогнозирования этих дефектов напрямую связана с точностью моделирования свободной поверхности. Общее признание при моделировании свободной поверхности получил VOF-метод (Volume-of-Fluid Method) [3]. В пакете *FLOW-3D®* этот метод реализован в виде TruVOF®, включающем в себя три главные составляющие [4].

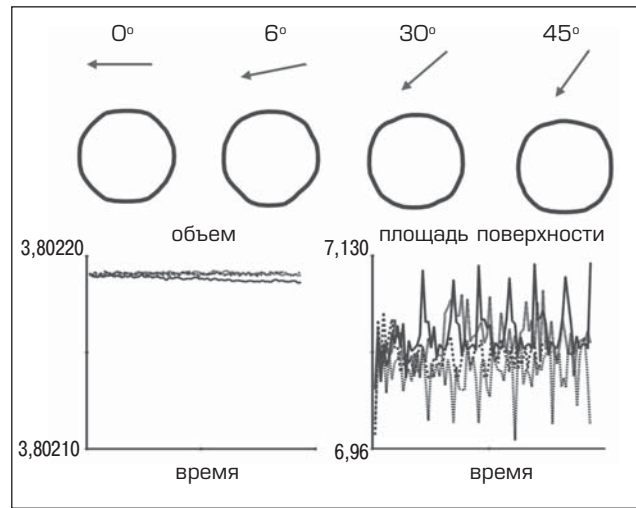
1. Схема определения местоположения поверхности.
  2. Алгоритм отслеживания поверхности как четкой поверхности раздела, перемещающейся по расчетной сетке.
  3. Средства приложения на этой поверхности граничных условий.
- Большинство САМ ЛП используют «псевдо VOF-метод», то есть используют только одну или две состав-



**Рис. 3.** Изменение объема и площади поверхности капли, движущейся под разными углами к горизонтальной образующей расчетной сетки, при расчете VOF-методом

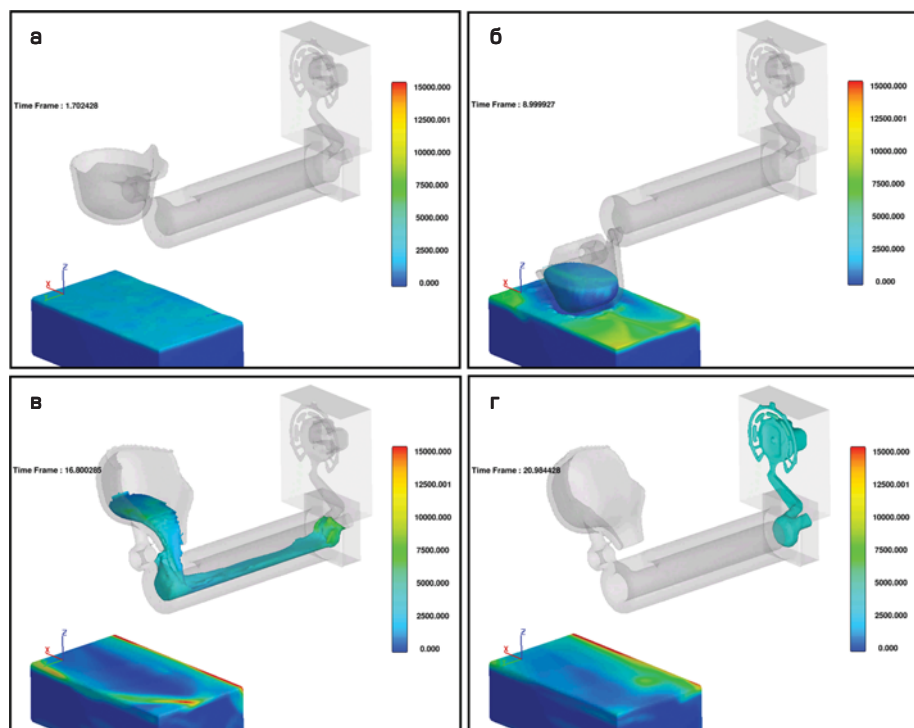
ляющие оригинального метода. Таким образом, с одной стороны, они получают возможность моделирования задач со свободной поверхностью как таковых, но с другой – адекватность результатов такого моделирования остается под вопросом. В [4] дано сравнение VOF и псевдо-VOF методов и показана нефизичность результатов последнего.

Важным аспектом метода TruVOF® является способность описывать сложные движения с минимальными кумулятивными ошибками. Стандартный VOF-метод при определенных условиях может приводить к сильному возрастанию численных ошибок. Хорошей иллюстрацией этого является пример поступательного движения капли при различных углах между направлением ее движения и направляющими прямоугольной расчетной сетки [5]. Такое движение часто называют «диагональным» или «скошенным». На рис. 3 показано изменение объема и площади поверхности капли, движущейся под различными углами к горизонтальной образующей расчетной сетки. Из рис. 3 видно, что при угле 45° имеет место максимальная ошибка, которая составляет по объему 30%, по площади поверхности – 300%. Метод TruVOF® включает специальные алгоритмы (*Lagrangian VOF advection*), которые позволяют снизить данную ошибку до допустимого уровня (рис. 4).



**Рис. 4.** Изменение объема и площади поверхности капли, движущейся под разными углами к горизонтальной образующей расчетной сетки, при расчете с использованием *Lagrangian VOF advection*

Часто причиной несовпадения результатов моделирования с экспериментом и, особенно, по литейным дефектам, образование которых может происходить вне полости отливки, является игнорирование при моделировании отдельных этапов технологического процесса. Например, при моделировании отливок, изготовляемых литьем под давлением, зона пресс-поршня, в которой может произойти захват воздуха расплавом, как правило, не рассматривается. Другой пример – оксидные пленки, образование которых начинается



**Рис.5, а-г.** Отслеживание дефектов отливки типа оксидных плен при ЛПД, начиная с плавильной печи и заканчивая запрессовкой

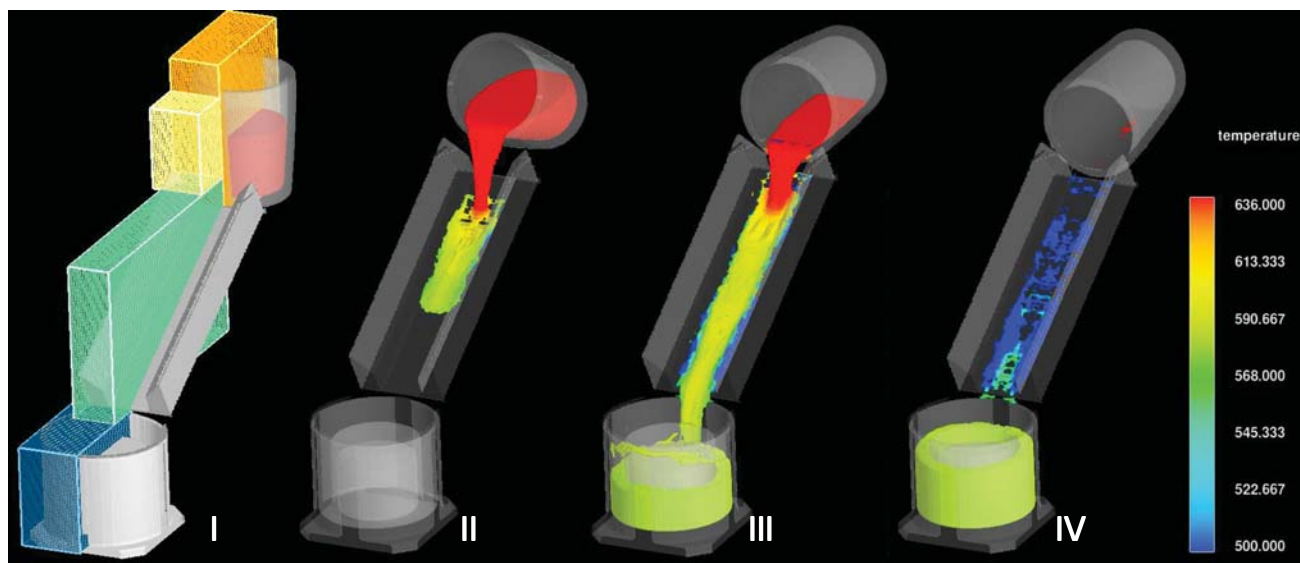


Рис. 6. Этапы моделирования процесса изготовления тиксозаготовки литьем расплава на водоохлаждаемый желоб

еще в плавильной печи и на этапе транспортировки расплава к литейной форме. Часть этих плен вместе с расплавом может попасть в отливку. Очевидно, что без включения этих процессов в моделируемую задачу, а в большинстве случаев ими пренебрегают, точное предсказание такого рода дефектов невозможно. Пакет **FLOW-3D®** имеет специальную General Moving Objects (GMO) модель для расчета взаимодействия потока с движущимися твердыми телами, в частности, для моделирования описанных процессов [6, 7]. На рис. 5 приведены этапы моделирования процесса литья под давлением и отслеживание оксидных плен, начиная от забора металла из плавильной печи до его запрессовки в пресс-форму.

Круг основных литейных задач (задачи заполнения, затвердевания и образования усадочных дефектов) может быть существенно расширен за счет перечисленных особенностей пакета **FLOW-3D®**. На рис. 6 показано моделирование процесса изготовления тиксозаготовок путем литья расплава алюминиевого сплава на водоохлаждаемый желоб [8]. Интенсивное охлаждение желоба приводит к образованию на нем твердой корочки, которая размывается свежими, более горячими порциями расплава, в результате чего часть дендритов смывается и поступает вместе с расплавом в форму. Форма заполняется расплавом с определенной долей твердой фазы. Управляют долей твердой фазы в расплаве путем изменения интенсивности охлаждения желоба, угла его наклона и другими параметрами. В этом моделировании были использованы методы многоблочной сетки (I на рис. 6), дезактивации расчетных ячеек, Lagrangian VOF advection для свободной поверхности и GMO модель для описания поворота тигля.

#### Заключение

Математическое моделирование литейных процессов становится неотъемлемой частью промышленного производства отливок и эффективным инструментом снижения их себестоимости и повыше-

ния качества. Круг литейных задач, требующих моделирования, непрерывно расширяется, а требования к скорости и точности решения непрерывно растут. Пакет **FLOW-3D®**, включающий уникальный набор численных алгоритмов и математических моделей в большой степени удовлетворяет этим требованиям, что подтверждено опытом большого числа промышленных предприятий, где данный пакет используется.

Благодаря тому, что компания Flow Science не закрыла информацию об используемых алгоритмах и математических моделях, а также возможности широкого управления параметрами этих алгоритмов и моделей, **FLOW-3D®** также активно используется в университетах и научно-исследовательских институтах для учебных и научных целей.

#### Список литературы

1. **Вольнов И.Н.** Системы автоматизированного моделирования литейных процессов – состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. – 2007. – №6. – С.14–17.
2. **Ильин В.П.** Методы конечных разностей и конечных объемов для эллиптических уравнений. – Новосибирск, Институт математики. – 2000. – 345 с.
3. **Hirt C.W., Nichols B.D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // J. Comp. Phys. – 1981. – №39. – P.201–225.
4. <http://www.flow3d.ru/cfd-101/whatsina.htm>
5. <http://www.flow3d.ru/pdfs/tn63r.pdf>
6. [http://flow3d.com/pdfs/tp/cast\\_tp/FloSci-Bib6-06.pdf](http://flow3d.com/pdfs/tp/cast_tp/FloSci-Bib6-06.pdf)
7. **Barkhudarov M., Wei G.** Modeling of the Coupled Motion of Rigid Bodies in Liquid Metal // Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Processes – XI, May 28 – June 2, 2006, Oporto, France, eds. Ch.-A. Gandin and M. Bellet. – 2006. – P. 71–78
8. **Семенов Б.И., Куштаров К.М.** Изготовление и использование заготовок с тиксоструктурой // Технология металлов. – 2004. – №5–7.