



One of the variants of optimization of the castings production technologies with the help of multiple-processor technologies of supercomputer SKIF is presented.

А. Н. ЧИЧКО, С. Г. ЛИХОВУЗОВ, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, В. Ф. СОБОЛЕВ,
О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОМПЬЮТЕРА СКИФ

Одним из эффективных инструментов, позволяющих существенно повысить уровень проектно-конструкторских работ в литейном производстве, являются компьютерные системы моделирования технологии изготовления отливок. В настоящее время рынок компьютерных технологий предлагает целую группу систем моделирования (Procast, MagmaSoft, AF Solid, WinCast, 3d-Flow, ПроЛит-1, Полигон и др.), которые различаются между собой по возможностям и численным схемам, используемым при формализации уравнений математического ядра. Математическое ядро всех перечисленных систем является предметом «know how» и закрыто для пользователя. Оценить адекватность математического аппарата и используемой при этом математики можно сравнивая результаты промышленных или экспериментальных исследований с результатами моделирования. Следует отметить, что существенный недостаток всех без исключения компьютерных систем – большое время моделирования процесса заполнения и кристаллизации металла на персональном компьютере. Особенно критичным время моделирования становится при использовании сложных в пространственном отношении форм, так как объект моделирования разбивается на миллионы и более сеточных элементов. При этом полное время моделирования может достигать нескольких суток только для одного технологического варианта. В таких условиях оптимизировать технологический процесс изготовления отливки довольно сложно. Это приводит к тому, что выбор технологии осуществляется среди небольшого количества вариантов, что снижает эффективность используемых программных средств на практике.

Повышения эффективности моделирования литейных процессов можно добиться с помощью мультипроцессорных технологий [1–3]. В настоящее время для реализации мультипроцессорных технологий в Объединенном институте проблем

информатики НАН Беларуси имеется суперкомпьютер СКИФ, созданный в результате совместных исследований белорусских и российских ученых. Использование суперкомпьютера открывает новые возможности для разработчиков технологических процессов. Использование интернет-технологий делает программное обеспечение СКИФ доступным для многих пользователей. Предполагается, что доступ к «ПроЛит-1с» через суперкомпьютер и ИНТЕРНЕТ получат промышленные предприятия обоих государств: России и Беларуси. На рис. 1 показана возможная схема работы технологов предприятия с программой «ПроЛит-1с».

Э т а п 1. Технолог с помощью систем компьютерной графики строит геометрическую модель отливки и различные варианты литниковой системы.

Э т а п 2. Формируются исходные данные по теплофизическим свойствам металла и формы, а также начальные условия заливки, которые пересылаются на СКИФ с помощью интернет-технологии для проведения расчетов.

Э т а п 3. Моделирование процесса заполнения форм и кристаллизации отливок. Формирование группы файлов различного объема с результатами расчетов.

Э т а п 4. Передача результатов расчетов по моделированию технологического процесса в упрощенной или полной форме со СКИФ на ПЭВМ на основе интернет-технологий.

При проведении компьютерного моделирования при анализе заполнения форм металлом важнейшими этапами являются:

- подготовка исходных данных по отливке, литниковой системе, теплофизическим данным расплава, а также начальные условия заливки (температура формы и металла);
- моделирование температурного поля системы «литниковая система–отливка–форма»;
- моделирование поля скоростей в форме;

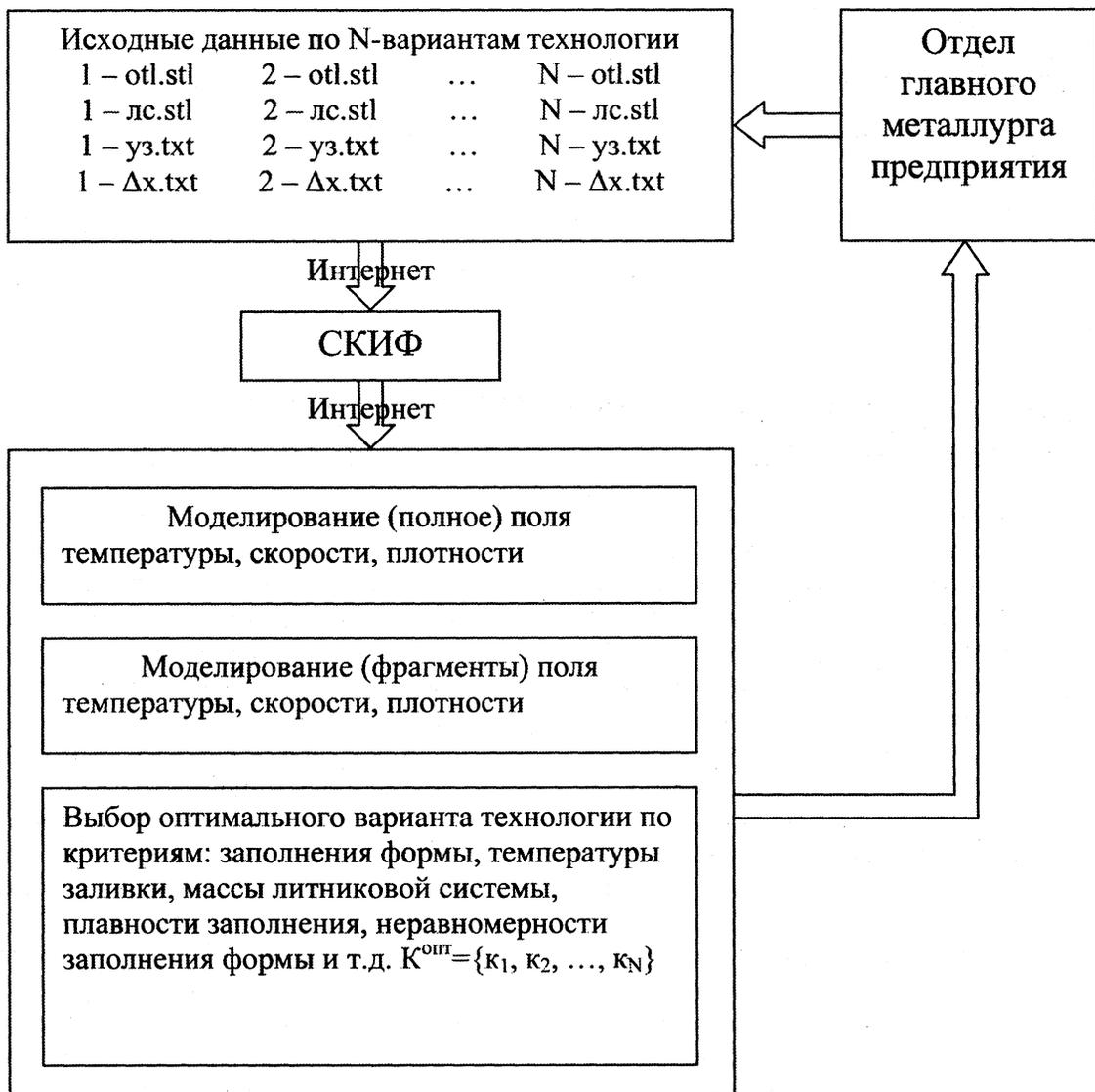


Рис. 1. Схема работы с программным обеспечением «ПроЛит-1с»

- моделирование поля плотности кристаллизующегося металла в форме;
- анализ недоливов и пористости в отливке на основе результатов моделирования поля температур скоростей и плотностей.

Фактически пятый этап является теоретической базой для принятия решения по данной литниковой системе и входным условием заливки. По этой упрощенной схеме организована работа технолога, расчетчика и разработчика технологического процесса. В ней нет оптимизации техпроцесса, а есть фактически проверка одного из предложенных технологом вариантов условий заливки и литниковой системы.

Дальнейшее совершенствование схемы разработки технологического процесса должно включать оптимизацию или выбор наилучшего технологического варианта среди возможных. Нахождение в глобальном смысле оптимальной литнико-

вой системы и условий заливки невозможно, так как таких вариантов может быть бесконечное множество в силу нелинейности данной задачи по отношению к литниковой системе, т. е. литниковая система по пространственной конфигурации может быть настолько разнообразной, что это не позволяет рассчитать все возможные технологические варианты. Следует отметить, что размеры литниковой системы существенно влияют на расход металла, необходимого для получения отливки методом литья в формы, причем это связано с энергозатратностью технологического процесса, так как литниковая система является возвратной при технологии получения отливок.

Возможности мультипроцессорных технологий могут быть использованы при совершенствовании технологического процесса на основе методов оптимизации. В этом случае этапы разработки могут быть представлены в следующем виде:

1) сформируем N вариантов технологического процесса, отличающихся литниковыми системами и начальными условиями заливки;

2) смоделируем N вариантов температурного поля системы «литниковая система–отливка–форма»;

3) смоделируем N вариантов поля скоростей в форме;

4) смоделируем N вариантов поля плотности кристаллизующегося металла в форме;

5) для N вариантов на основе поля температур скоростей и плотностей рассчитаем распределение недоливов и пористости в отливке;

6) на основе критериев оптимизации процесса заполнения формы построим по ранжиру варианты в сторону наилучшего с технологической точки зрения варианта.

Для реализации этапа 6 были разработаны пять критериев для оценки технологического варианта. В качестве первого критерия использован коэффициент заполняемости, который определяется как количество сеточных элементов формы, не заполненных металлом. Чем больше это количество, тем выше вероятность образования дефектов типа недолив при заполнении формы. В качестве второго критерия используется коэффициент температуры заливки, которая является энергетической составляющей технологического варианта. Чем выше температура заливки, тем больше энергии затрачено на получение годной отливки. В качестве третьего критерия используется коэффициент массы литниковой системы. Чем больше коэффициент массы литниковой системы, тем большее количество металла и энергии необходимо для получения годной отливки. В качестве четвертого критерия используется коэффициент плавности заполнения формы, который определяется как сумма квадратов скоростей каждого сеточного элемента во всем временном промежутке заполнения. Чем больше этот коэффициент, тем больше абсолютная составляющая скоростного поля и выше ее влияние на стенки формы, т. е. при увеличении этого коэффициента повышается вероятность размыва формы. В качестве пятого критерия (коэффициент неравномерности заполнения) используется величина, равная сумме отклонений ячеечных скоростей от средней скорости в данный момент времени. Чем больше этот коэффициент, тем выше вероятность захвата воздуха и неметаллических частиц в отливку. Каждый из критериев позволяет ранжировать технологические варианты. Однако для выбора наилучшего варианта среди рассчитанных может быть использована целевая функция вида

$$k = a_1k_1 + a_2k_2 + a_3k_3 + a_4k_4 + a_5k_5 \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где коэффициенты a_1, \dots, a_5 отражают вклад каждого из рассчитываемых критериев. Коэффициенты a_1, \dots, a_5 могут подбираться на основе опыта технолога, а также с учетом требований, предъявляемых к отливке. Например, если энергетический фактор коэффициента k_2 можно опустить по какой-либо причине, то коэффициент a_2 принимается равным 0.

Таким образом, процесс разработки технологии изготовления отливки состоит из задания группы технологических вариантов, просчета их на суперкомпьютере и выбора оптимального варианта по описанным выше критериям. Достоинство этой схемы заключается в том, что технолог очень быстро может принять решение о выборе одного или нескольких базовых вариантов, не используя полную информацию о процессе заполнения отливки в динамике по сечениям, т. е. упрощается и автоматизируется работа технологов и процесс принятия ими решений. В этом случае технолог может затратить свое время на процесс разработки новых литниковых систем. Следует отметить и то, что такой трудоемкий процесс расчета становится эффективным только при использовании возможностей суперкомпьютера. В этом случае моделирование сложных в пространственном отношении отливок и литниковых систем может быть особенно полезно при использовании оптимизационных критериев. Следует отметить и то, что этот оптимизационный подход эффективен тогда, когда все рассчитанные литниковые системы обеспечивают заполнение формы. В этом случае для испытаний также необходимо выбрать лучший вариант, что позволяют сделать протоколы расчета формы (1).

Таким образом, оптимизация, как метод выбора наилучшей литниковой системы и условий заполнения, становится реальной именно при использовании возможностей мультипроцессорных технологий.

Рассмотрим возможности использования разработанных критериев для оценки качества заполнения формы с помощью «ПроЛит-1с». Для решения этой задачи была выбрана деталь средней степени сложности (рис. 2).

Как видно из рисунка, количество мест подвода для данной детали ограничено вследствие ее симметрии, однако размерные характеристики литниковой системы могут быть достаточно разнообразны. В качестве базового варианта была выбрана литниковая система (рис. 3), для которой, используя традиционные методы (методика Озанна-Диттерта), были определены соотношения элементов (1:1,2:1,4). Так как приведенное отношение является не оптимальным, а базовым, в дальней-

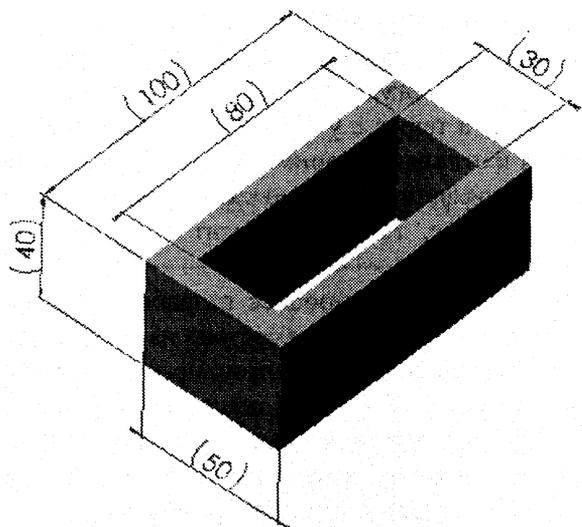


Рис. 2. Основные размеры тестовой детали

шем были построены различные модификации, характеризующие соотношения основных размеров литниковой системы: площади стояка, шлакоуловителя, питателя (см. таблицу).

При решении задачи моделирования на суперкомпьютере СКИФ было рассчитано 27 вариантов

литниковых систем. Как показал компьютерный анализ, многие из вариантов на качественном уровне технологически близки, поэтому для дальнейшего анализа были отобраны три характерные литниковые системы. Результирующие протоколы для рассчитываемого процесса заполнения приведены на рис. 4–7. Для выделенного момента времени на рис. 4 показан расчетный протокол по группам распределений температур, давлений, скоростей температур для одного из вариантов технологии, отличающийся от других размерами сечений питателя, шлакоуловителя и стояка. Такой протокол просчитывается для каждого технологического варианта. Как видно из рисунка, наиболее нагретые сеточные элементы наблюдаются для варианта «Деталь_32_36_90», что может быть связано с очень малым сечением питателя, в результате чего поле скоростей охлаждается за меньшее время.

На рис. 5 показано распределение температур для трех вариантов литниковых систем на момент времени заполнения отливки 7,5 с. По этим распределениям температур оценивается склонность каждого варианта литниковой системы к образованию дефектов типа «недолив». На рис. 6 представле-

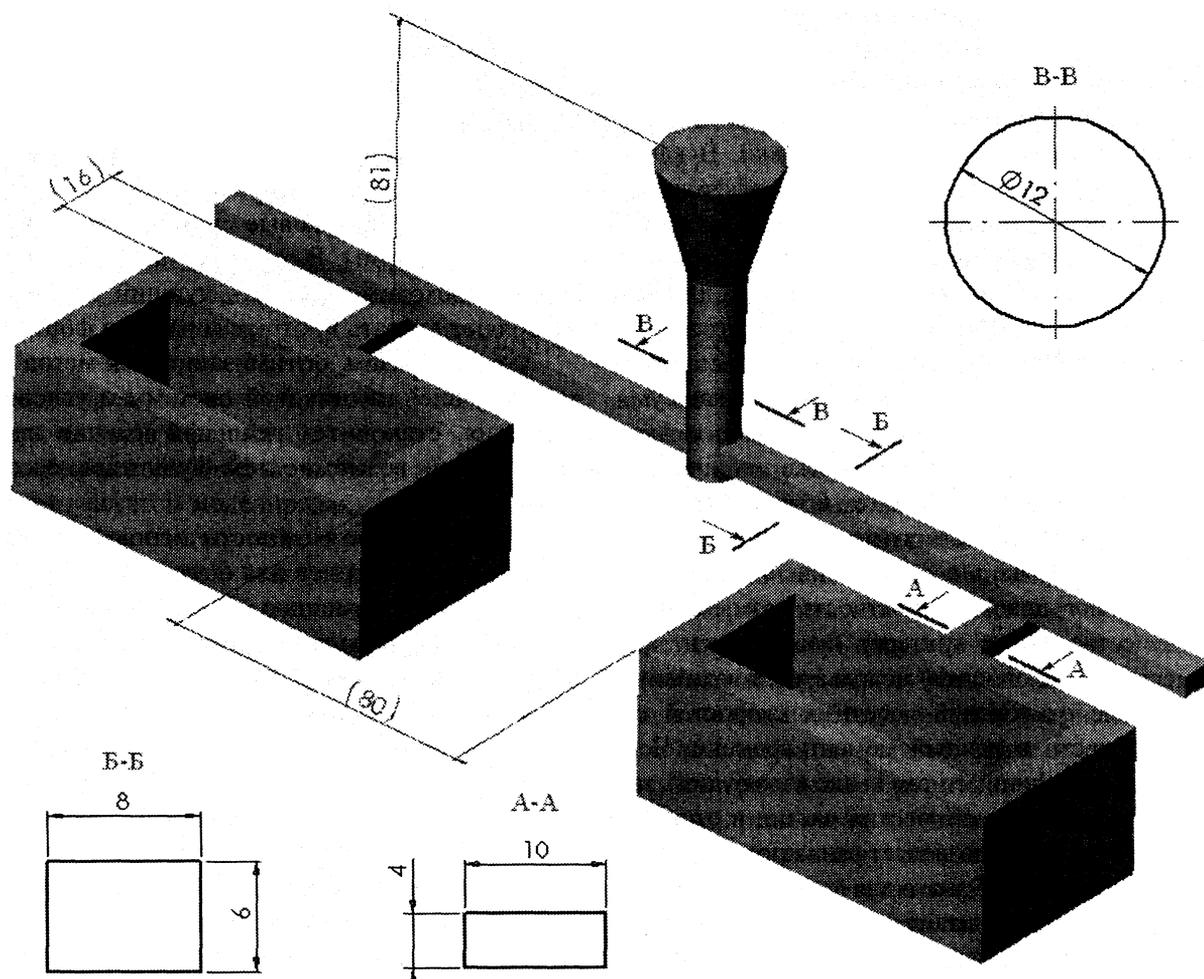


Рис. 3. Базовый вариант литниковой системы

Соотношения элементов литниковой системы для каждого из вариантов

Номер варианта	Отливка	F1	F2	F3	Отношение F1 :F2 :F3
1	Деталь_32_36_90	32	36	45	1:1,13:1,4
2	Деталь_32_36_112	32	36	56	1:1,13:1,75
3	Деталь_32_36_134	32	36	67	1:1,13:2,1
4	Деталь_32_48_90	32	48	45	1:1,5:1,4
5	Деталь_32_48_112	32	48	56	1:1,5:1,75
6	Деталь_32_48_134	32	48	67	1:1,5:2,1
7	Деталь_32_60_90	32	60	45	1:1,87:1,4
8	Деталь_32_60_112	32	60	56	1:1,87:1,75
9	Деталь_32_60_134	32	60	67	1:1,87:2,1
10	Деталь_40_36_90	40	36	45	1:0,9:1,13
11	Деталь_40_36_112	42	36	56	1:0,9:1,4
12	Деталь_40_36_134	40	36	67	1:0,9:1,67
13	Деталь_40_48_90	40	48	45	1:1,2:1,13
14	Деталь_40_48_112	40	48	56	1:1,2:1,4
15	Деталь_40_48_134	40	48	67	1:1,2:1,67
16	Деталь_40_60_90	40	60	45	1:1,5:1,13
17	Деталь_40_60_112	40	60	56	1:1,5:1,4
18	Деталь_40_60_134	40	60	67	1:1,5:1,67
19	Деталь_48_36_90	48	36	45	1:0,75:0,94
20	Деталь_48_36_112	48	36	56	1:0,75:1,17
21	Деталь_48_36_134	48	36	67	1:0,75:1,4
22	Деталь_48_48_90	48	48	45	1:1:0,94
23	Деталь_48_48_112	48	48	56	1:1:1,17
24	Деталь_48_48_134	48	48	67	1:1:1,4
25	Деталь_48_60_90	48	60	45	1:1,25:0,94
26	Деталь_48_60_112	48	60	56	1:1,25:1,17
27	Деталь_48_60_134	48	60	67	1:1,25:1,4

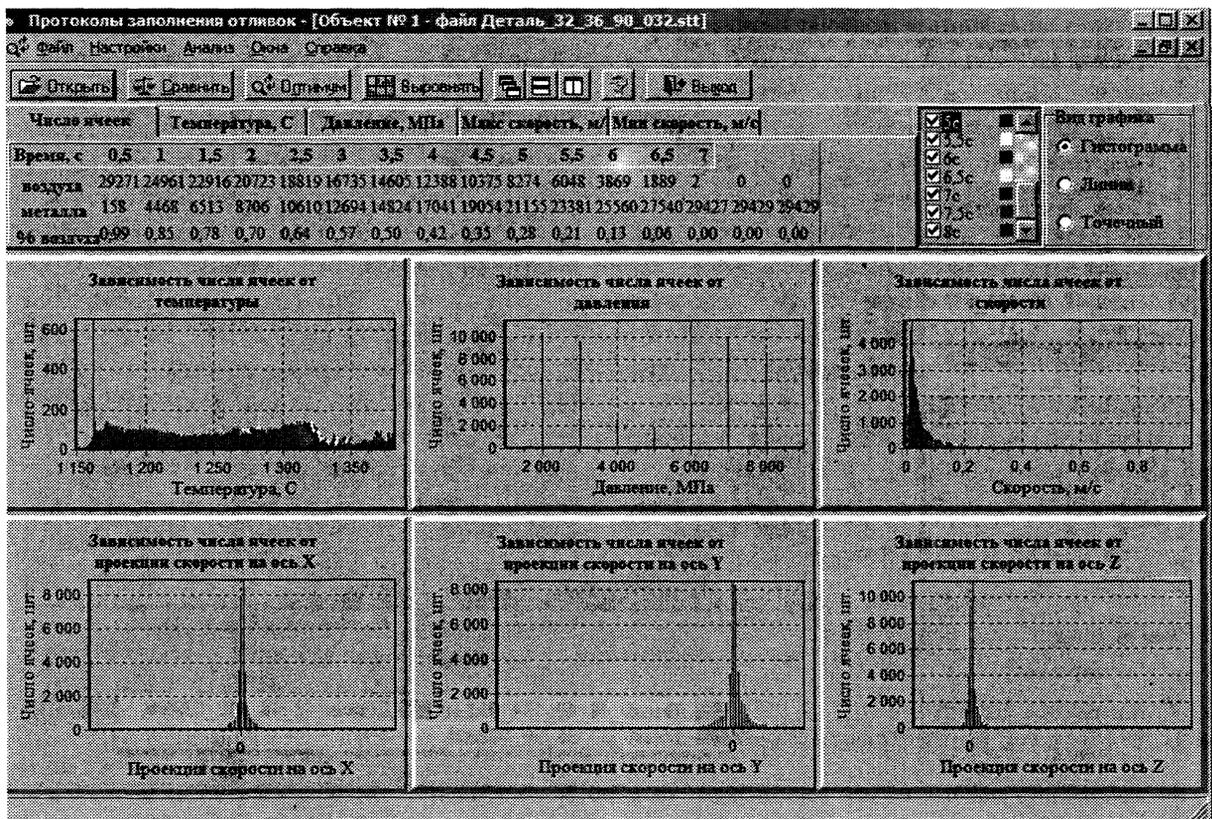


Рис. 4. Протокол для анализа технологического варианта «Деталь_32_36_90_032.stt»

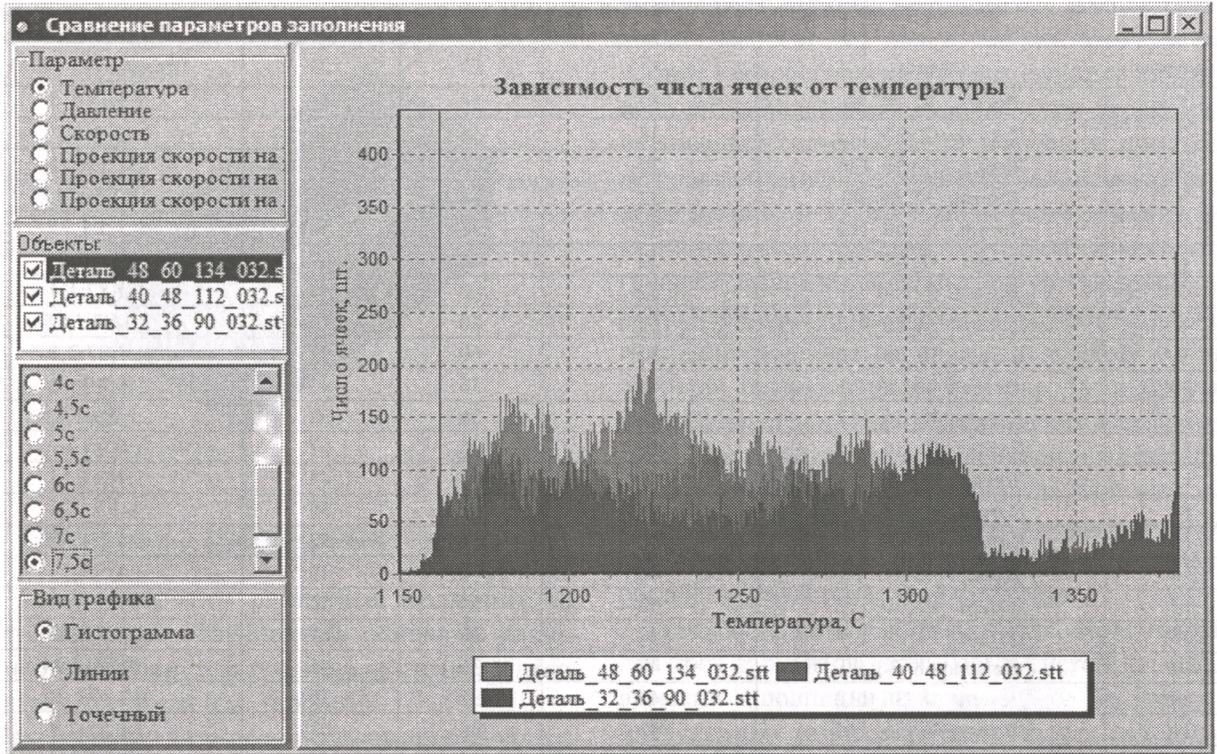


Рис. 5. Протокол распределения температур для трех технологических вариантов на момент времени заполнения отливки $\tau = 7,5$ с

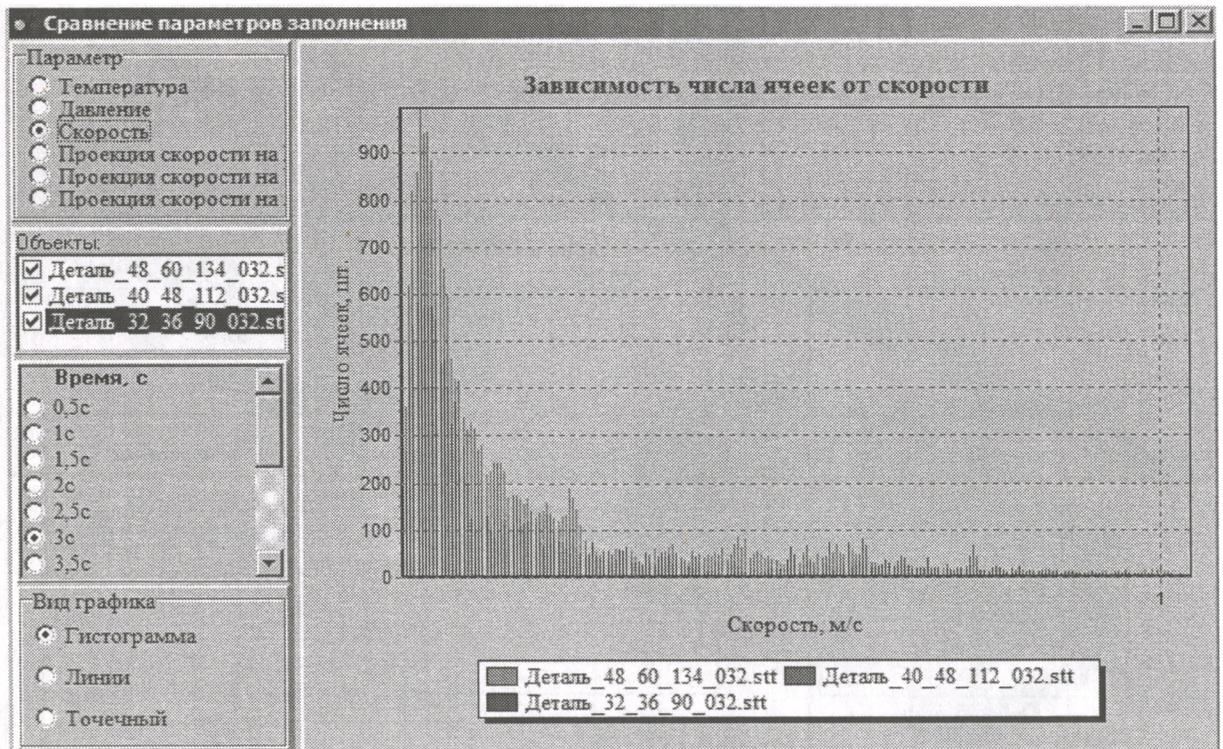


Рис. 6. Протокол распределения скоростей на момент времени заполнения отливки $\tau = 3$ с для трех технологических вариантов

Критериальная оценка				
Оптимальная по совокупности критериев отливка				
Деталь_32_36_90_032.stt				
По заполненности	По температуре заливки	По массе литниковой системы	По плавности заполнения	По равномерности заполнения
Деталь_48_60_112_032.stt - 0	Деталь_48_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_90_032.stt - 29429	Деталь_32_36_134_032.stt - 106,55	Деталь_48_60_134_032.stt - -1,47
Деталь_48_60_90_032.stt - 0	Деталь_48_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_90_032.stt - 29469	Деталь_32_48_134_032.stt - 107,19	Деталь_48_60_112_032.stt - -1,38
Деталь_48_48_134_032.stt - 0	Деталь_48_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_90_032.stt - 29509	Деталь_32_48_112_032.stt - 107,82	Деталь_48_60_90_032.stt - -0,99
Деталь_48_48_112_032.stt - 0	Деталь_48_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_112_032.stt - 29547	Деталь_32_36_112_032.stt - 108,09	Деталь_40_60_134_032.stt - 0,20
Деталь_48_48_90_032.stt - 0	Деталь_48_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_112_032.stt - 29587	Деталь_32_48_90_032.stt - 109,21	Деталь_48_48_112_032.stt - 0,28
Деталь_48_36_134_032.stt - 0	Деталь_48_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_112_032.stt - 29627	Деталь_32_36_90_032.stt - 109,46	Деталь_48_48_134_032.stt - 0,31
Деталь_48_36_112_032.stt - 0	Деталь_48_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_36_134_032.stt - 29716	Деталь_32_60_134_032.stt - 111,11	Деталь_40_60_112_032.stt - 0,38
Деталь_48_36_90_032.stt - 0	Деталь_48_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_36_134_032.stt - 29756	Деталь_32_60_112_032.stt - 111,13	Деталь_40_60_90_032.stt - 0,50
Деталь_40_60_134_032.stt - 0	Деталь_40_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_36_134_032.stt - 29796	Деталь_40_36_134_032.stt - 111,80	Деталь_48_48_90_032.stt - 0,57
Деталь_40_60_112_032.stt - 0	Деталь_40_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_90_032.stt - 29837	Деталь_40_36_90_032.stt - 112,47	Деталь_48_36_134_032.stt - 1,35
Деталь_40_60_90_032.stt - 0	Деталь_40_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_90_032.stt - 29877	Деталь_40_48_112_032.stt - 112,76	Деталь_40_36_112_032.stt - 1,53
Деталь_40_48_134_032.stt - 0	Деталь_40_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_90_032.stt - 29917	Деталь_40_48_134_032.stt - 112,82	Деталь_40_48_134_032.stt - 2,04
Деталь_40_48_112_032.stt - 0	Деталь_40_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_112_032.stt - 29965	Деталь_40_36_112_032.stt - 112,91	Деталь_48_36_90_032.stt - 2,09
Деталь_40_48_90_032.stt - 0	Деталь_40_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_112_032.stt - 30005	Деталь_32_60_90_032.stt - 113,00	Деталь_40_48_112_032.stt - 2,19
Деталь_40_36_134_032.stt - 0	Деталь_40_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_112_032.stt - 30045	Деталь_48_36_134_032.stt - 114,30	Деталь_32_60_134_032.stt - 2,23
Деталь_40_36_112_032.stt - 0	Деталь_40_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_48_134_032.stt - 30080	Деталь_48_36_112_032.stt - 116,02	Деталь_40_48_90_032.stt - 2,45
Деталь_40_36_90_032.stt - 0	Деталь_40_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_48_134_032.stt - 30120	Деталь_40_48_90_032.stt - 116,12	Деталь_32_60_90_032.stt - 2,47
Деталь_32_60_134_032.stt - 0	Деталь_32_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_48_134_032.stt - 30160	Деталь_48_36_90_032.stt - 116,31	Деталь_40_60_112_032.stt - 2,47
Деталь_32_60_112_032.stt - 0	Деталь_32_60_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_90_032.stt - 30247	Деталь_48_48_134_032.stt - 117,11	Деталь_40_36_134_032.stt - 2,79
Деталь_32_60_90_032.stt - 0	Деталь_32_60_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_90_032.stt - 30285	Деталь_40_60_134_032.stt - 117,30	Деталь_40_36_112_032.stt - 2,90
Деталь_32_48_134_032.stt - 0	Деталь_32_48_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_90_032.stt - 30325	Деталь_48_48_112_032.stt - 117,54	Деталь_40_36_90_032.stt - 3,17
Деталь_32_48_112_032.stt - 0	Деталь_32_48_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_112_032.stt - 30365	Деталь_48_48_90_032.stt - 117,90	Деталь_32_48_112_032.stt - 4,36
Деталь_32_48_90_032.stt - 0	Деталь_32_48_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_112_032.stt - 30405	Деталь_40_60_112_032.stt - 118,08	Деталь_32_48_134_032.stt - 4,41
Деталь_32_36_134_032.stt - 0	Деталь_32_36_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_112_032.stt - 30445	Деталь_40_60_90_032.stt - 118,90	Деталь_32_48_90_032.stt - 4,54
Деталь_32_36_112_032.stt - 0	Деталь_32_36_112_032.stt - 1380	Деталь_32_60_134_032.stt - 30476	Деталь_48_60_134_032.stt - 120,11	Деталь_32_36_134_032.stt - 4,72
Деталь_32_36_90_032.stt - 0	Деталь_32_36_90_032.stt - 1380	Деталь_40_60_134_032.stt - 30516	Деталь_48_60_90_032.stt - 120,22	Деталь_32_36_112_032.stt - 4,88
Деталь_48_60_134_032.stt - 0	Деталь_48_60_134_032.stt - 1380	Деталь_48_60_134_032.stt - 30556	Деталь_48_60_112_032.stt - 120,30	Деталь_32_36_90_032.stt - 5,12

Рис. 7. Критериальная оценка для 27 технологических вариантов заполнения отливок

но распределение скоростей для трех технологических вариантов, на основе которых рассчитывается критерий, характеризующий разброс по скоростям. На рис. 7 приведены результаты моделирования в виде пяти критериев по 27 вариантам. Из этой последовательности технолог может выбрать оптимальный вариант, руководствуясь зависимостью вида (1).

Таким образом, среди рассчитанных вариантов по пяти критериям оптимальным является вариант «Деталь_32_36_90», который позволяет заполнить форму без недоливов, обеспечивает минимальные энергозатраты на плавку, минимум массы литниковой системы, низкое значение коэффициента плавности заполнения и невысокое значение коэффициента неравномерности заполнения.

Таким образом, компьютерная система «ПроЛит-1с» может представлять практический интерес для промышленных предприятий, имеющих литейные цеха, на которых разрабатываются технологии получения отливок. Такими предприятиями являются РУП «Минский тракторный завод», РУП «Минский автомобильный завод», РУП «Гомельский литейный

завод «Центролит», ОАО «Минский завод отопительного оборудования», ОАО «Могилевский металлургический завод» и др. Установив рабочее место технолога и связь через Интернет с суперкомпьютером СКИФ, на промышленных предприятиях с помощью «ПроЛит-1с» можно решать задачи, связанные с разработкой технологического процесса изготовления отливок сложной конфигурации и, тем самым, снизить время разработки технологического процесса. «ПроЛит-1с» позволит автоматизировать процесс разработки технологического процесса и снизить литейный брак отливок за счет оптимизации технологических режимов и пространственной конфигурации литниковых систем. «ПроЛит-1с» отличается от известных программных средств, реализованных под один процессор, тем, что программное обеспечение работает под мультипроцессорные технологии суперкомпьютера СКИФ, что существенно снижает время моделирования расчета процесса заполнения сложных в пространственном отношении форм, а также встроенными модулями оптимизации, позволяющими снизить время принятия решения по выбору технологическими вариантами.

Литература

1. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г., Чичко О. И. Программное обеспечение «ПроЛит-1с» для моделирования литейных процессов на кластерных мультипроцессорных технологиях суперкомпьютера СКИФ // Литье и металлургия. 2007. № 3. С. 76–80.
2. Чичко А. Н., Лихоузов С. Г., Соболев В. Ф., Сачек О. А., Чичко О. И. Компьютерная система «ПроЛит-1с» под суперкомпьютер СКИФ для расчета процесса течения расплава в промышленных формах // Литье и металлургия. 2008. № 1. С. 71–78.
3. Чичко А. Н., Кукуй Д. М., Соболев В. Ф. и др. Программное обеспечение под суперкомпьютер СКИФ «ПроЛит-1с» и «ПроНПС-1с» для литейного и металлургического производств // Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 131–139.