

УТВЕРЖДАЮ

28 октября 2004 г.

Сабиров Д.Х.  
директор ООО «ФОКАД»

**Отчёт о моделировании литейной технологии для  
отливки «Коллектор» в системе моделирования литейных процессов  
ПОЛИГОН**

Исполнитель:

ООО «ФОКАД»

инженер

Бройтман О.А.

Заказчик:

ОАО «КамЛит»

Санкт-Петербург  
2004

## 1. Постановка задачи

Ставилась задача по моделированию литейной технологии для отливки «Коллектор». Отливка изготавливается литьём в песчано-глинистую форму, сплав – ВЧ40, температура заливки 1450°C. Необходимо было оценить возможность получения здоровой отливки при существующей технологии, выявить места, в которых возможны усадочные дефекты.

## 2. Этапы моделирования

Имелась 3D модель отливки и формы, построенная в CAD-системе (рис. 2.1), использовали формат \*.igs. Для имеющегося геометрического образа объекта моделирования была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка в объёме отливки и в объёме формы (в данном случае принималось, что он один – в условиях, выданных на моделирование было оговорено, что материал стержней и наполнителя принимается одинаковым с точки зрения теплоотводящей способности).

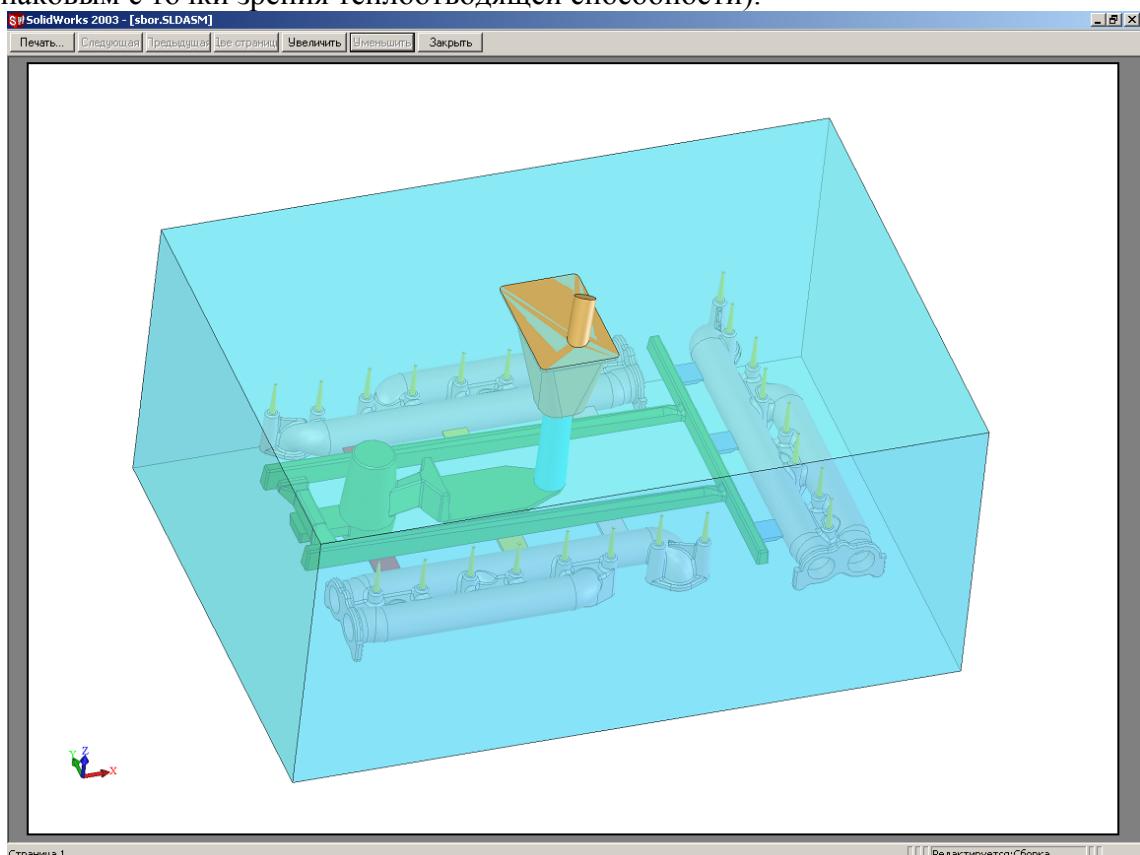
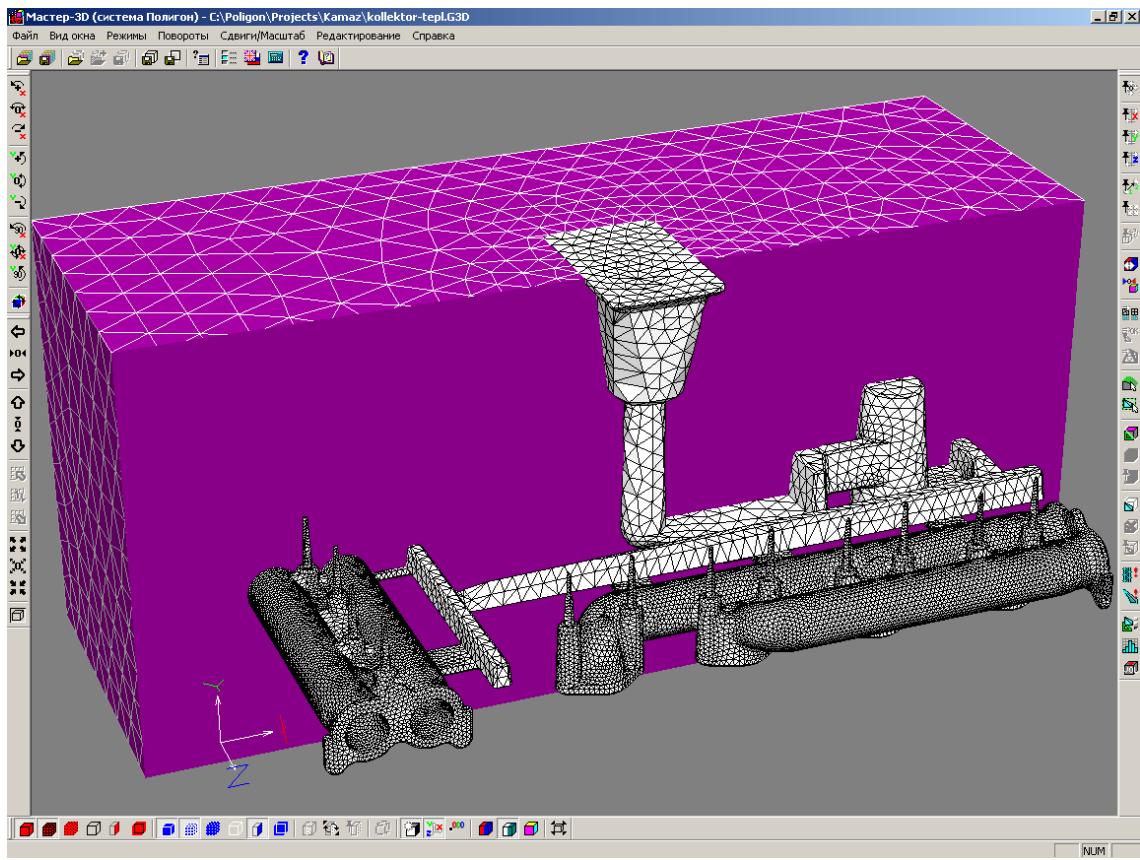
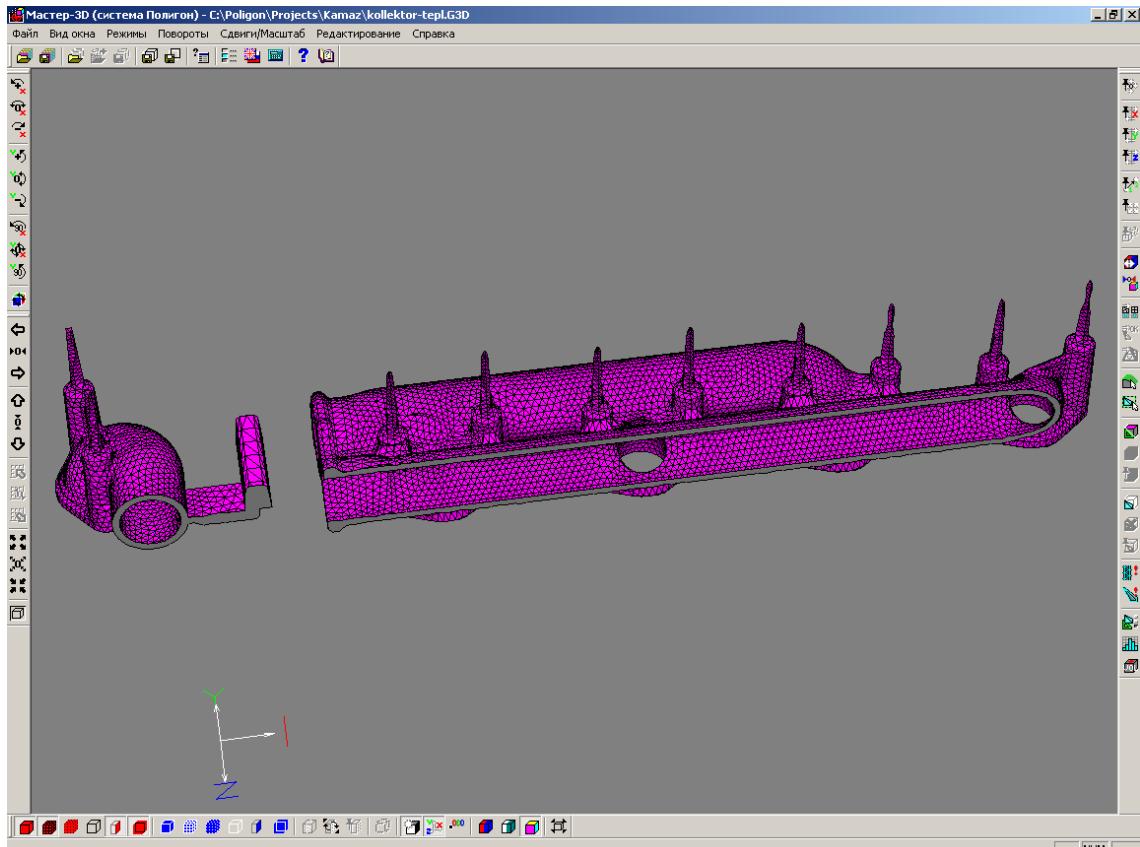


Рис. 2.1. Геометрическая модель, направляемая на генерацию КЭ-сетки

Полученная КЭ-сетка была импортирована в систему компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон». В препроцессоре системы «Полигон» импортированная сетка редактировалась в полуавтоматическом режиме – модель ориентировалась в пространстве относительно вектора силы тяжести, назначались индексы границ и объёмов, производилась диагностика качества сетки, её автоматическая оптимизация и правка. Конечно-элементная модель отливки в форме затем передавалась в расчётные модули – собственно, процессор системы «Полигон». Подготовленная для расчёта КЭ-модель представлена на рис. 2.2.



а



б

Рис. 2.2. Геометрическая КЭ-модель  
а – форма показана в сечении;  
б – произвольное сечение для отливки, форма скрыта

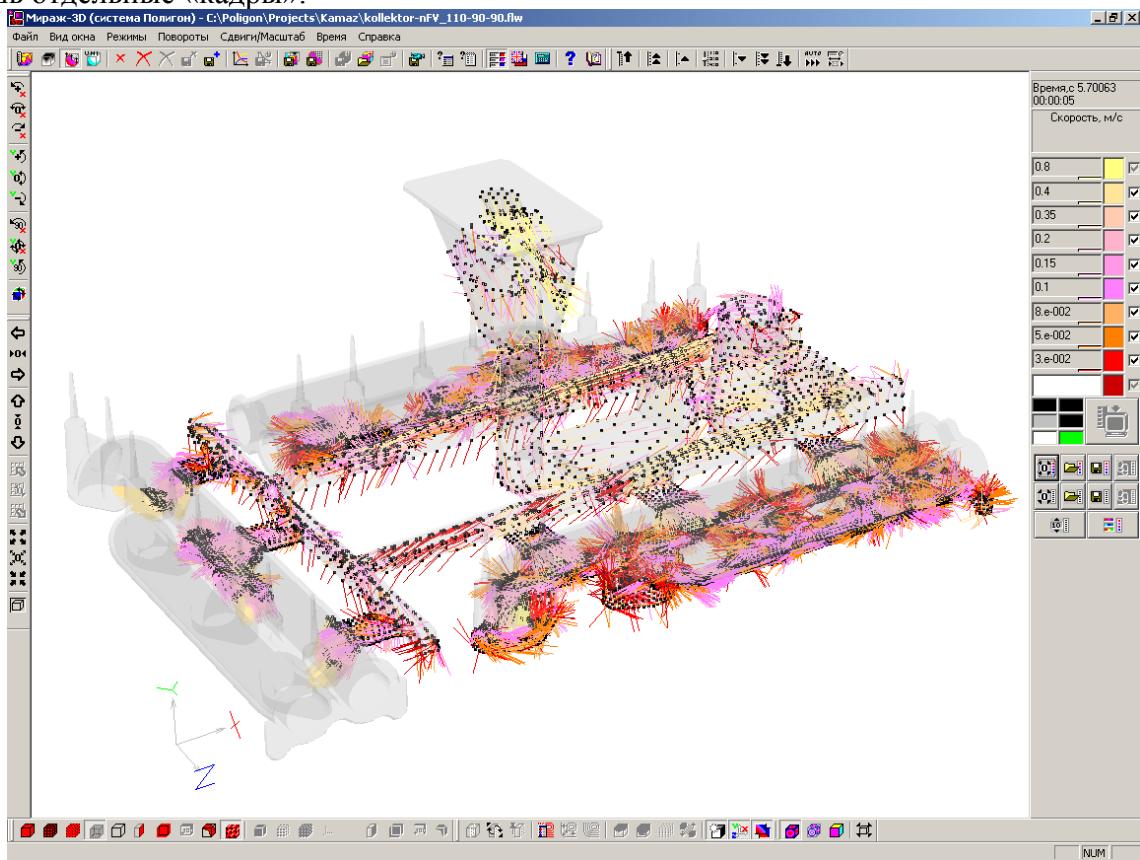
Из рис. 2.2 видно, что в направляемой на расчёт КЭ-сетке различен размер конечного элемента в различных частях отливки (формы). За счёт этого есть возможность корректно обсчитывать как тонкие части отливки, так и толстые, при этом не настраиваясь в процессе генерации сетки на минимальную толщину стенки отливки, получая чрезмерно мелкую сетку в толстых частях, где это излишне. Таким образом, далее получим экономию времени, затрачиваемого на расчёт, нет завышенных требований к вычислительной технике и т.д.

Следующий этап – задание теплофизических свойств материалов отливки и формы, а также усадочных свойств сплава. Термофизические свойства материалов формы и отливки, равно как и усадочные свойства сплава, были взяты из внутренней базы данных «Полигона» и подключённой к пакету справочной системы.

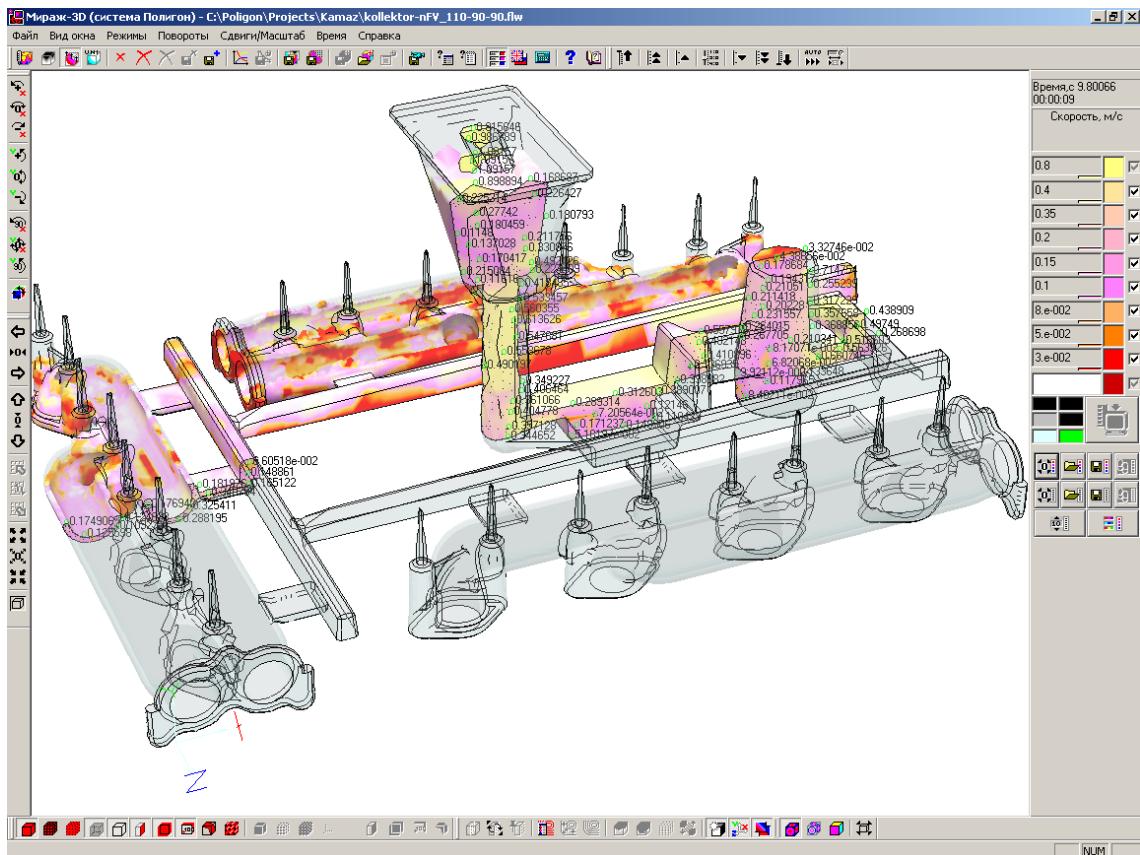
Расчёт затвердевания (тепловой расчёт, сопряжённый с усадочным) обычно предваряется гидродинамическим расчётом. По результатам гидродинамического расчёта технолог прослеживает поле скоростей (рис. 2.3) на протяжении процесса течения металла в полости формы (в том числе – в пристеночном слое, что важно с точки зрения оценки вероятности размыва, можно обнаружить застойные зоны, завихрения потока, контролировать скорости течения и т.д.), а также поле температур (рис. 2.4) в металле при заполнении (на основании этого можно проанализировать не переохлаждается ли слишком сильно металл при течении, получить поле температур по окончании заливки и т.д.).

Сложное, неравномерное по телу отливки поле температур, имеющее место в отливке на момент окончания заливки (рис. 2.4в), загружается как стартовое поле температур перед началом затвердевания в тепловом модуле «Полигона», что повышает адекватность моделирования.

Результаты гидродинамического расчёта можно затем проанализировать в динамике – в автоматическом режиме просмотреть «фильм» о заполнении полости формы, просматривать пошагово, производить любые сечения и т.д. На рис. 2.3 и 2.4. приведены лишь отдельные «кадры».

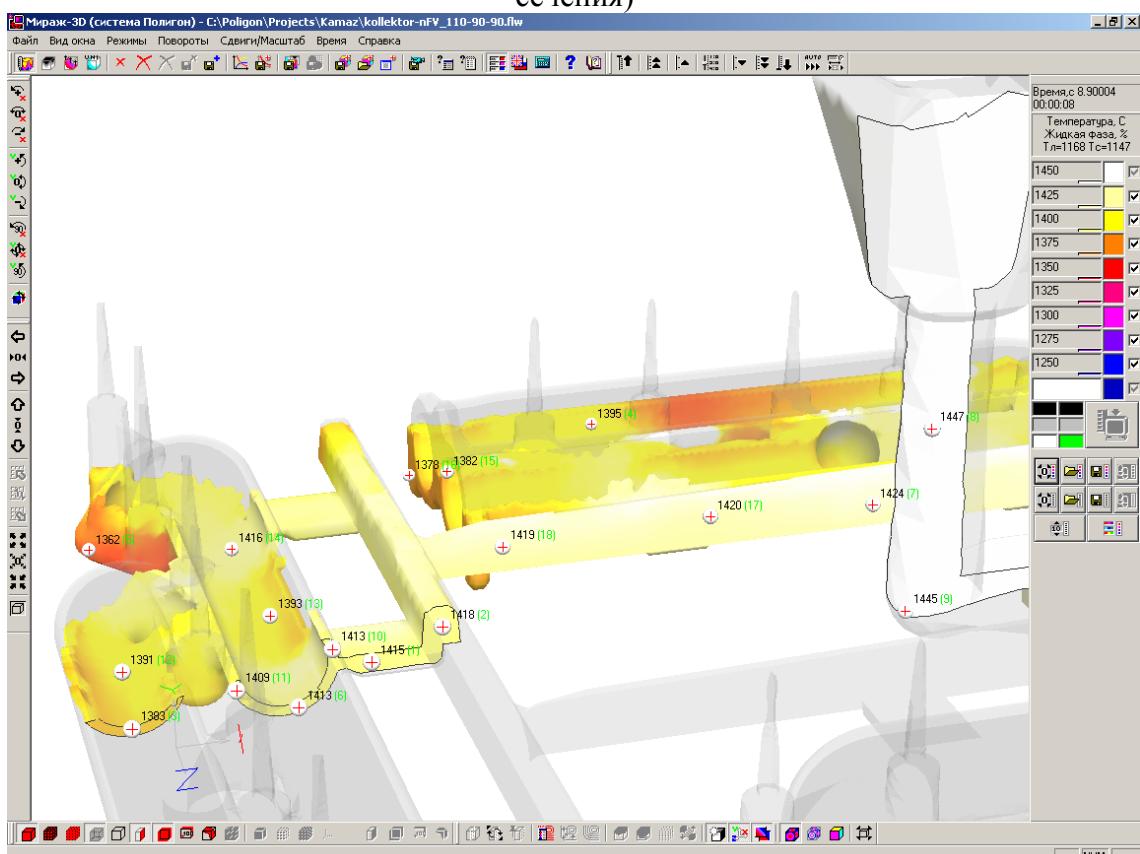


а

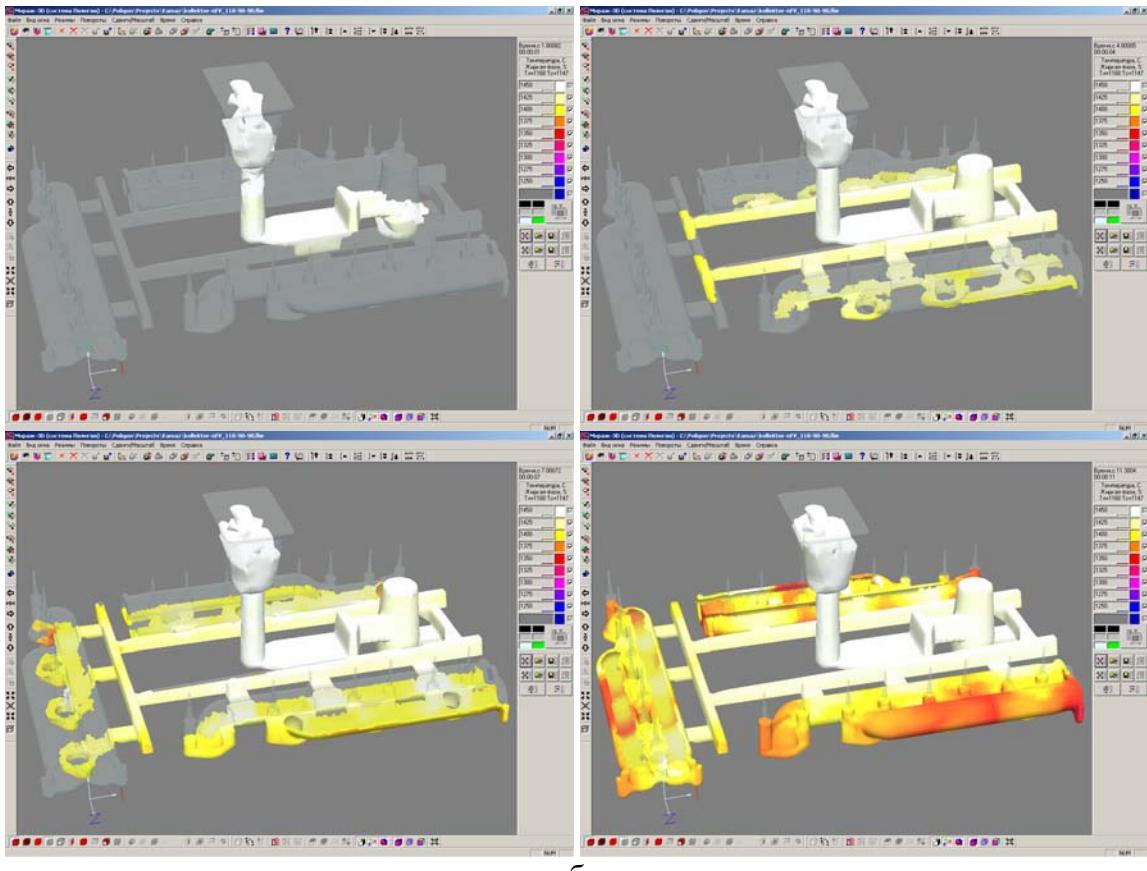


б

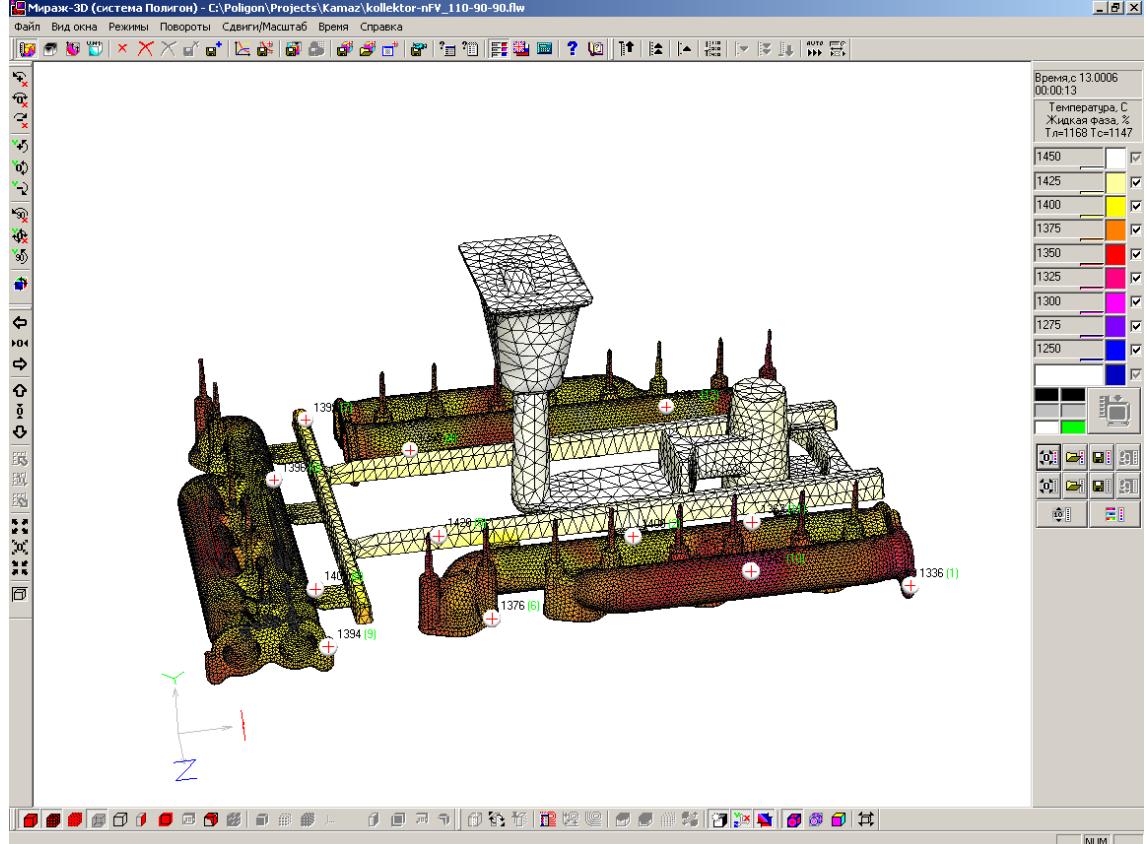
Рис. 2.3. Визуализация результатов гидродинамического расчёта (скорости)  
 а – начальная стадия заполнения (включён показ векторов скоростей у границы раздела отливка-форма);  
 б – на завершающей стадии заполнения (показано сечение, включена оцифровка сечения)



а

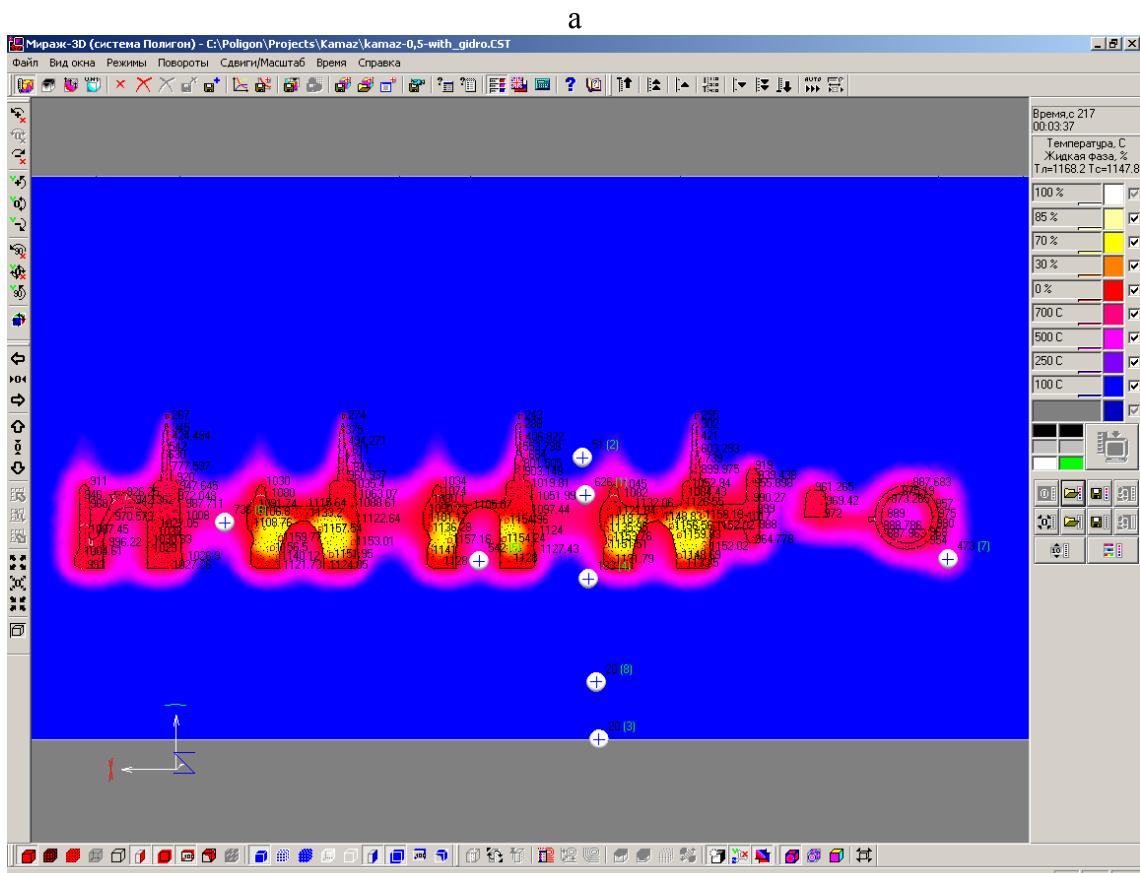
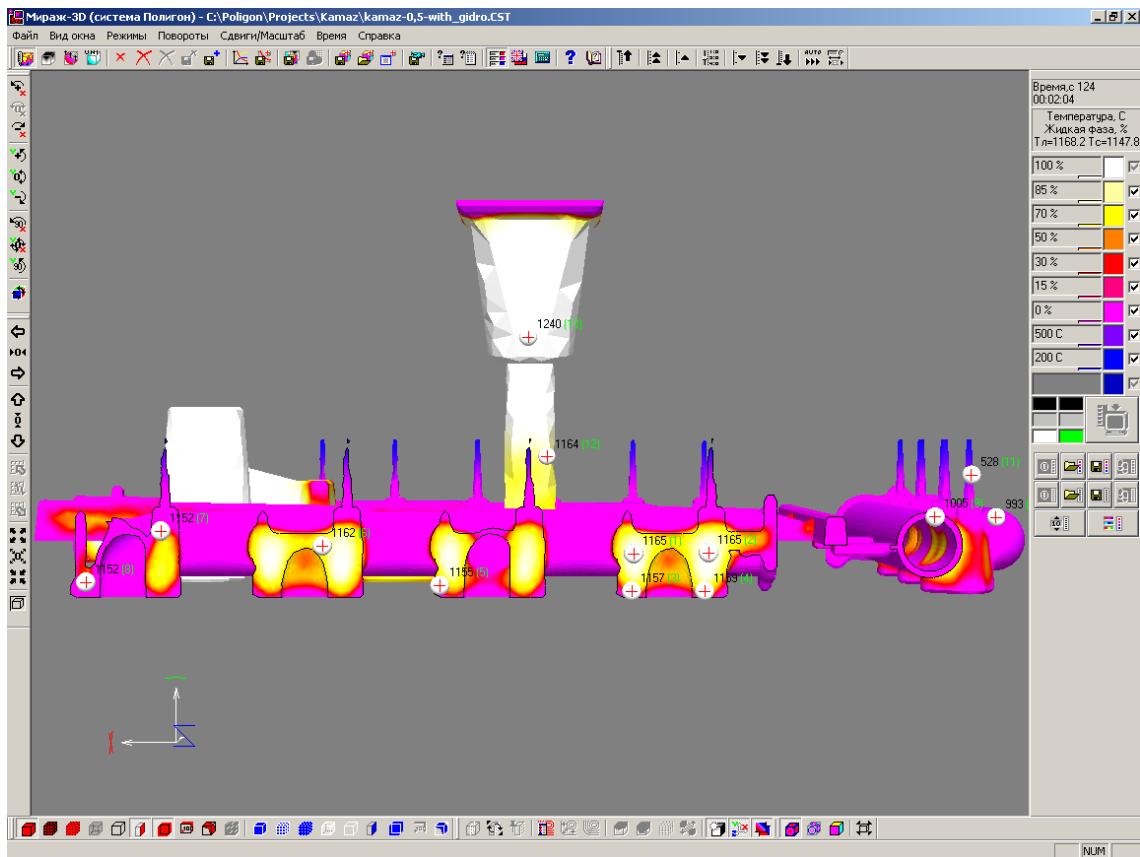


б



в

Рис. 2.4. Визуализация результатов гидродинамического расчёта (температуры)  
 а – промежуточная стадия заполнения (изображение увеличено, отображено сечение, отмечен ряд точек, в которых показана температура);  
 б – поле температур в теле отливки на различных стадиях заполнения;  
 в – поле температур в отливке по окончанию заливки



### 6

Рис. 2.5. Поля температур в процессе затвердевания в характерном сечении отливки  
а – одна из промежуточных стадий затвердевания (124 с. от момента заполнения полости  
формы), видно формирование тепловых узлов;  
б – одна из стадий затвердевания (217 с.), включена оцифровка сечения отливки, показаны  
температуры в нескольких точках по сечению формы – очевиден прогрев формы

На рис. 2.3 и 2.4 различные части отливки окрашены в разные цвета, согласно принятой шкале скоростей (рис. 2.3) либо температур (рис. 2.4) и присвоенных различным скоростям (температурам) цветов, которые соответствуют определённым значениям скорости (температуры) в тех или иных местах отливки. Шкала на рисунках находится в правой части окна программы.

Следующим этапом стала серия расчётов затвердевания, сопряжённых с расчётом усадочных дефектов.

Одним из вариантов визуализации результатов расчёта является просмотр изменения температурного поля в отливке (рис. 2.5). Можно произвести любое сечение, прослеживать температуры как в отливке, так и в форме, если это необходимо, просматривать «фильм» пошагово либо в автоматическом режиме и т.д. Ниже будет рассмотрен гораздо более мощный способ визуализации результатов, нежели вывод сечений – вывод зон, в которых поля расчётных величин находятся выше (ниже) определённого задаваемого значения изоповерхности.

Результаты расчёта усадочных дефектов приведены на рис. 2.6 и 2.7.

Расчет раковин и макропористости (формируется в условиях недостатка питания в зонах, расположенных выше уровня зеркала расплава) основан на вычислении объемной усадки и расчете движения зеркала расплава в каждой изолированной области питания. При этом решается задача определения на каждом временном шаге всех изолированных зон питания и уровня зеркала расплава в каждой зоне. Необходимо также упомянуть об используемой в «Полигоне» модели о сложной структурированности двухфазной зоны: используется понятие о трёх критических точках, характеризующих количество жидкой фазы в некотором объёме в определённый момент времени, определяющих процесс питания и, как следствие, формирования усадочных дефектов. Это точка начала линейной усадки  $P_1$ , точка прекращения гравитационного течения жидкости  $P_2$ , точка полного перекрытия междендритных каналов  $P_3$ . Критические точки существенно зависят от способа приготовления расплава, от характерных скоростей охлаждения в интервале затвердевания и ряда других параметров. Вопрос о точном определении критических точек представляется некорректным, поскольку в реальных условиях они меняются в широких пределах. Поэтому логично при ответственном моделировании варьировать данные неконсервативные параметры, чтобы оценить устойчивость имеющейся технологии к экстремальным значениям критических точек.

Кроме макропористости «Полигон» считает и микропористость, формирующуюся в условиях недостатка питания в зонах, которые потенциально находятся в удачных по питанию условиях (ниже зеркала расплава), однако недостаточно давление металла над проблемной зоной. Для просчёта этого механизма формирования усадки «Полигон» вычисляет в каждый момент времени изменение поля давлений во всём теле отливки и решает дифференциальное уравнение фильтрационного течения.

Как показал расчёт, вид и расположение усадочных дефектов в исследуемой отливке существенно не меняется при варьировании оговоренных критических точек.

Просматривая результаты расчёта в «Полигоне», можно вывести на экран изоповерхности (поверхности равных значений пористости либо температур, скоростей, доли жидкой фазы и проч.), зоны выше или ниже заданного значения изоповерхности. Этот инструмент очень удобен для определения зон изоляции объёмов жидкого металла в теле отливки: на экране не отображаются уже затвердевшие части отливки, наблюдаем лишь те, в которых есть жидкая фаза.

На рис. 2.8 выведены зоны выше определённого значения изоповерхности для иллюстрации процесса образования изолированного объёма жидкости. Очевидно, что наличие массивных частей, питание которых затруднено, в преимущественно тонкостенной отливке, обуславливает возникновение дефектных зон.

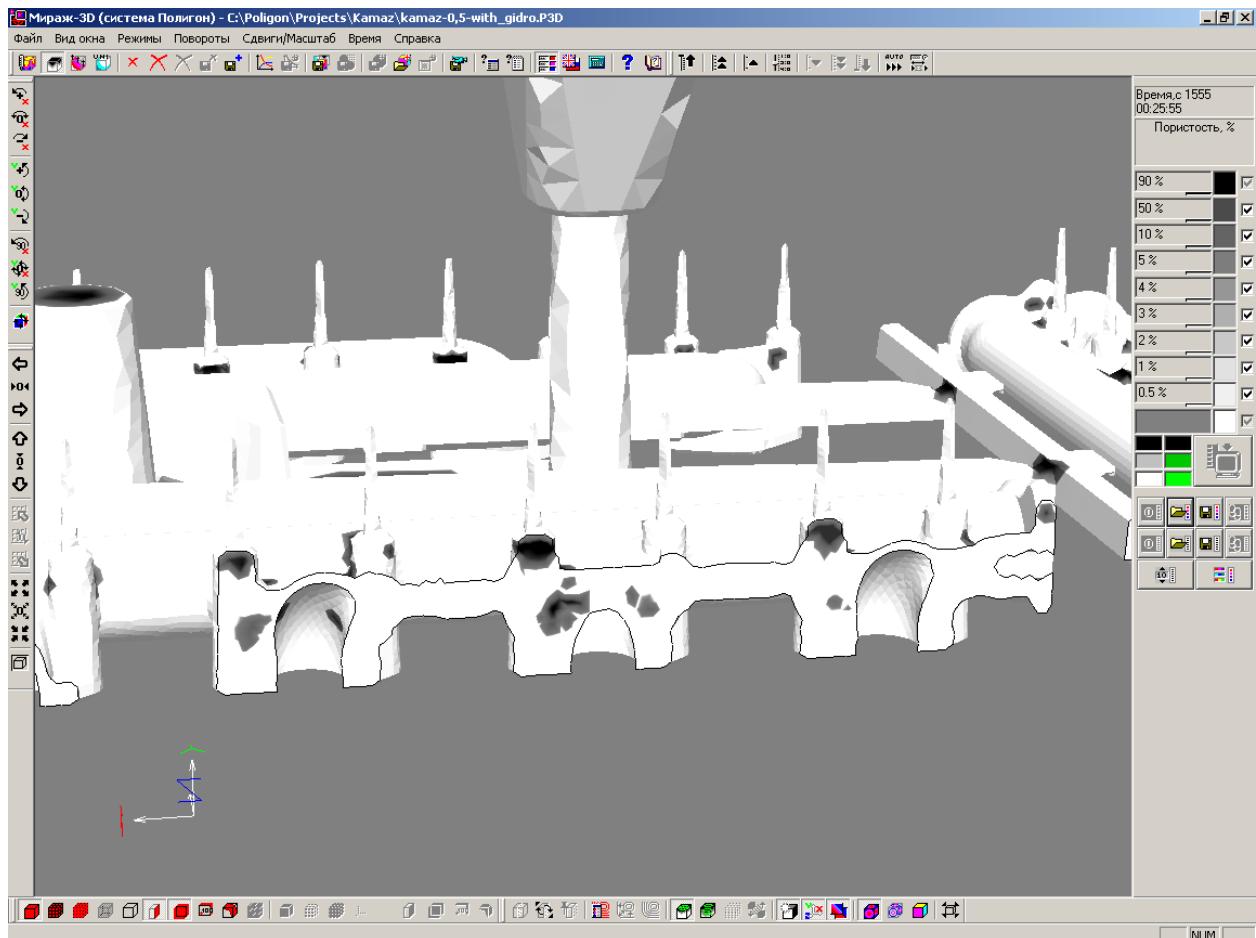
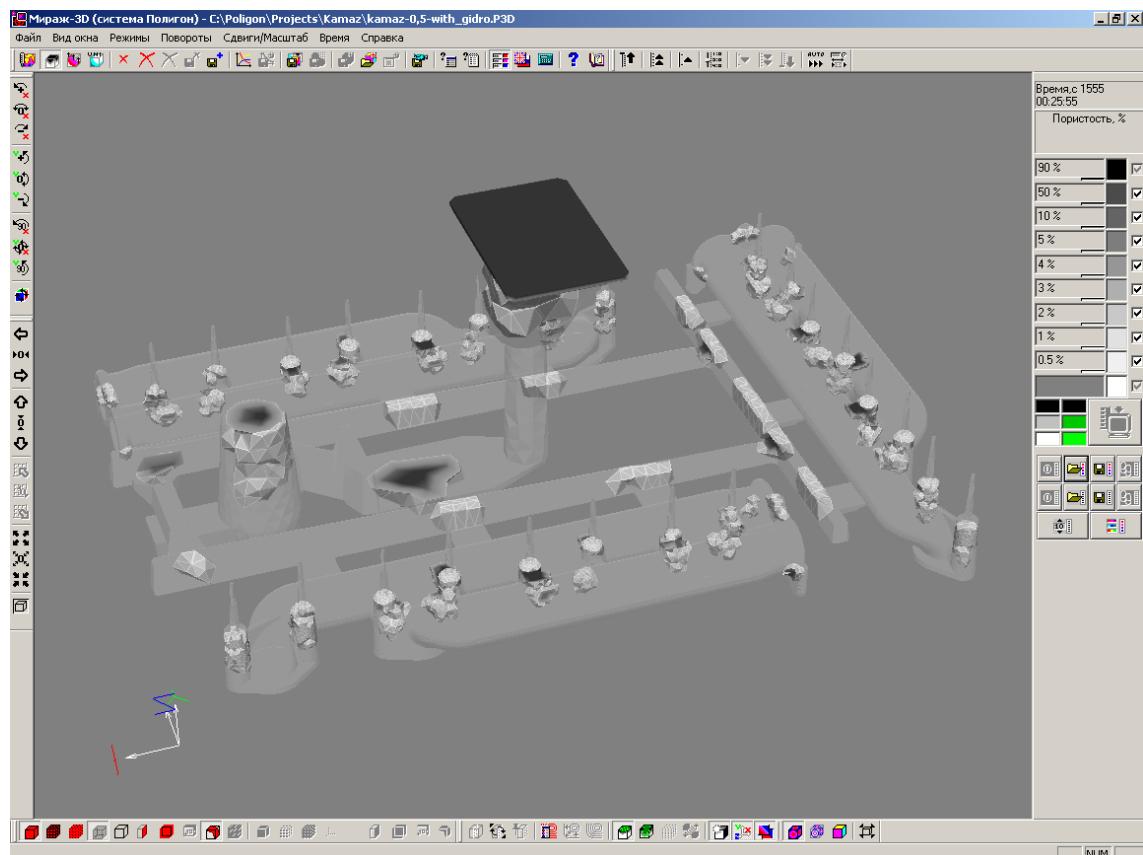
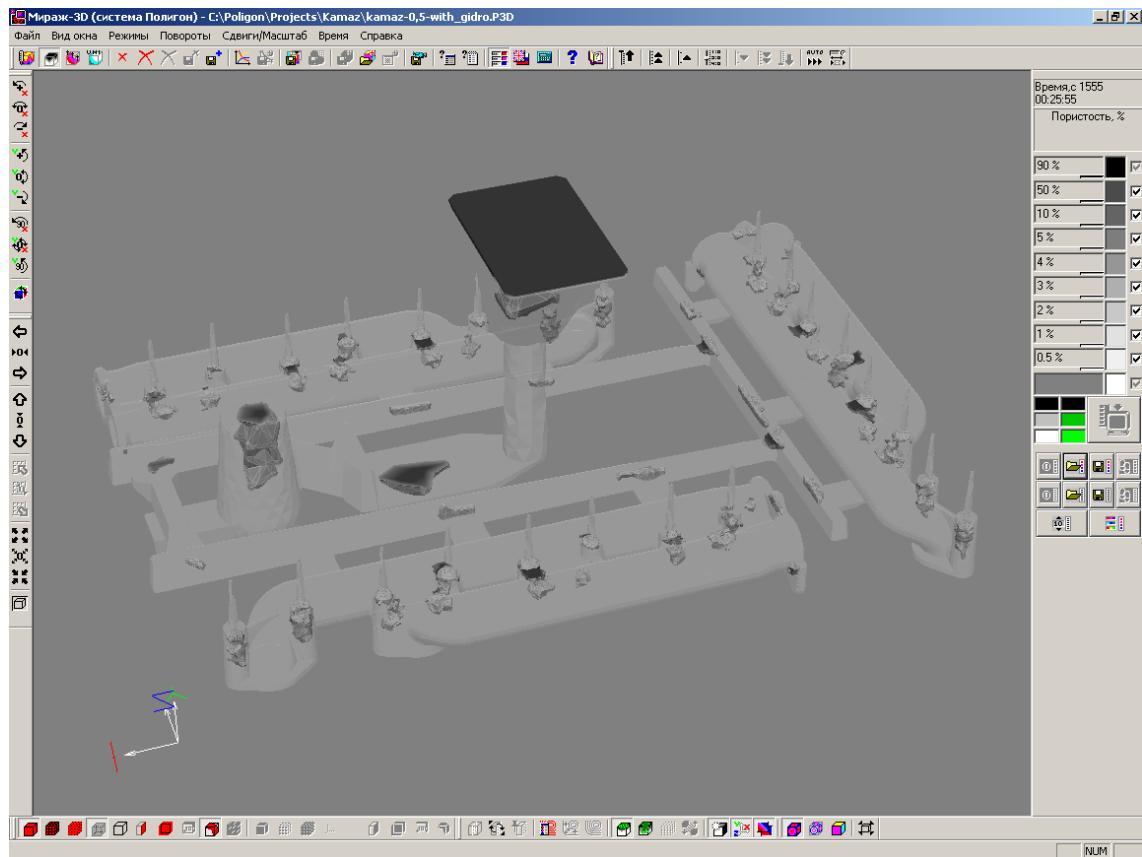


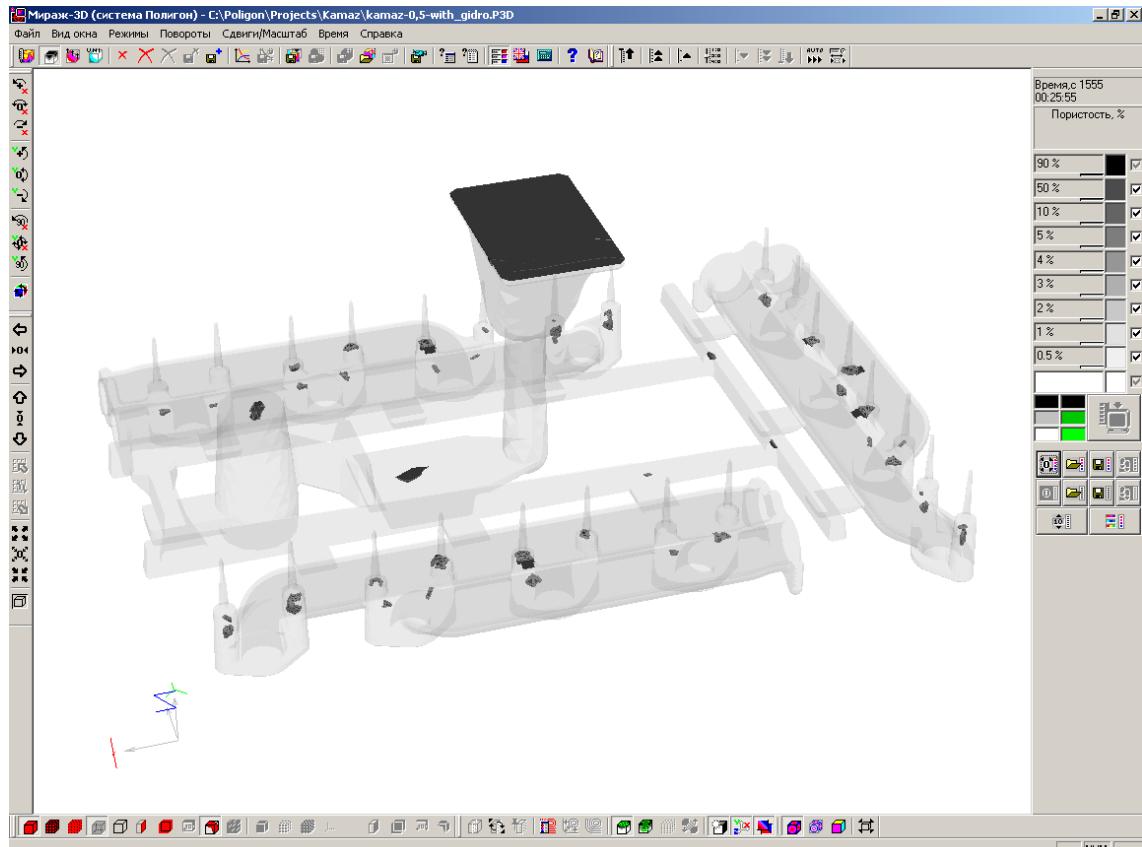
Рис. 2.6. Усадочные дефекты в теле отливки (сечение)



a

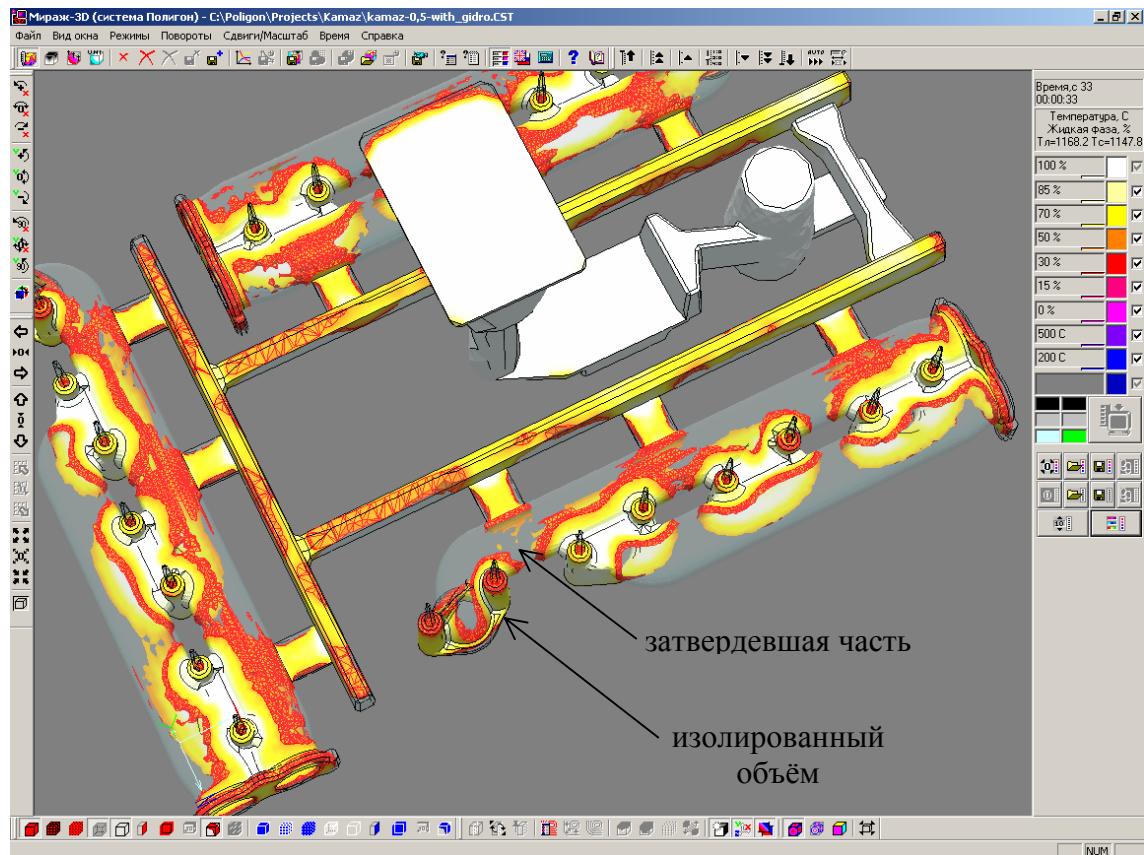


б

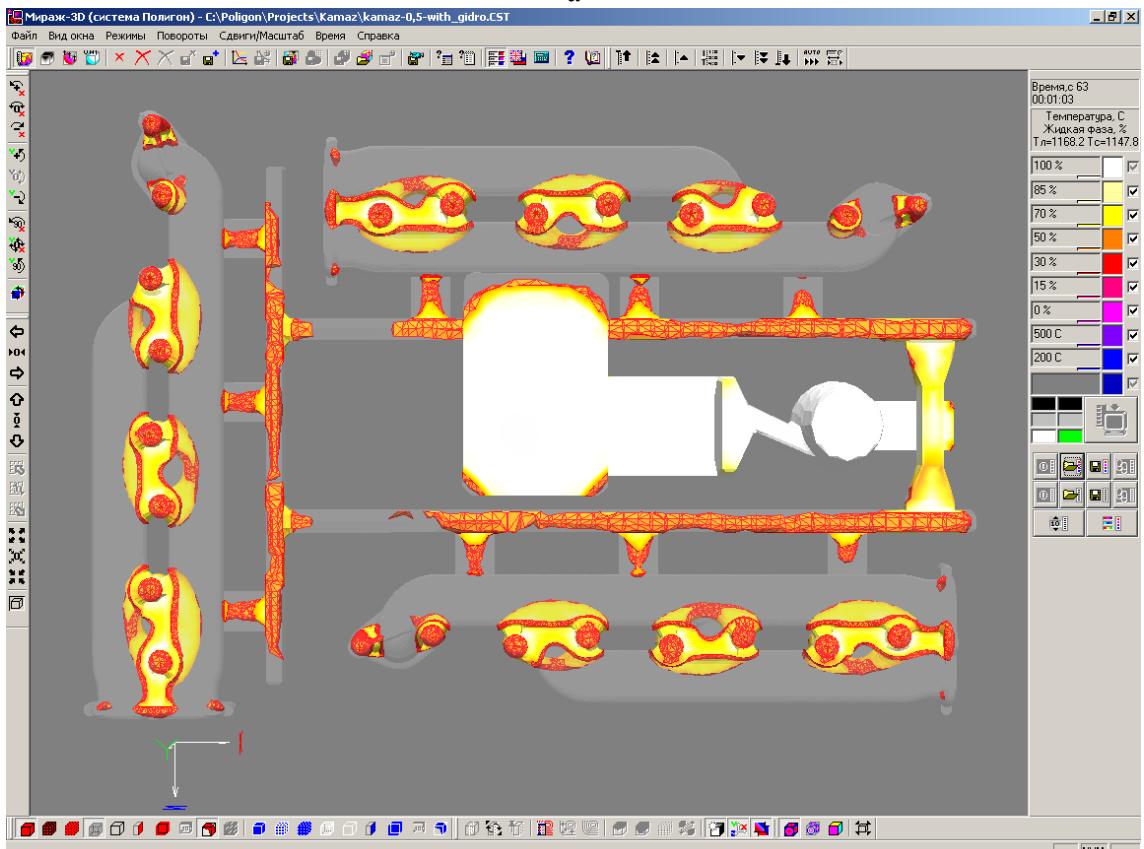


в

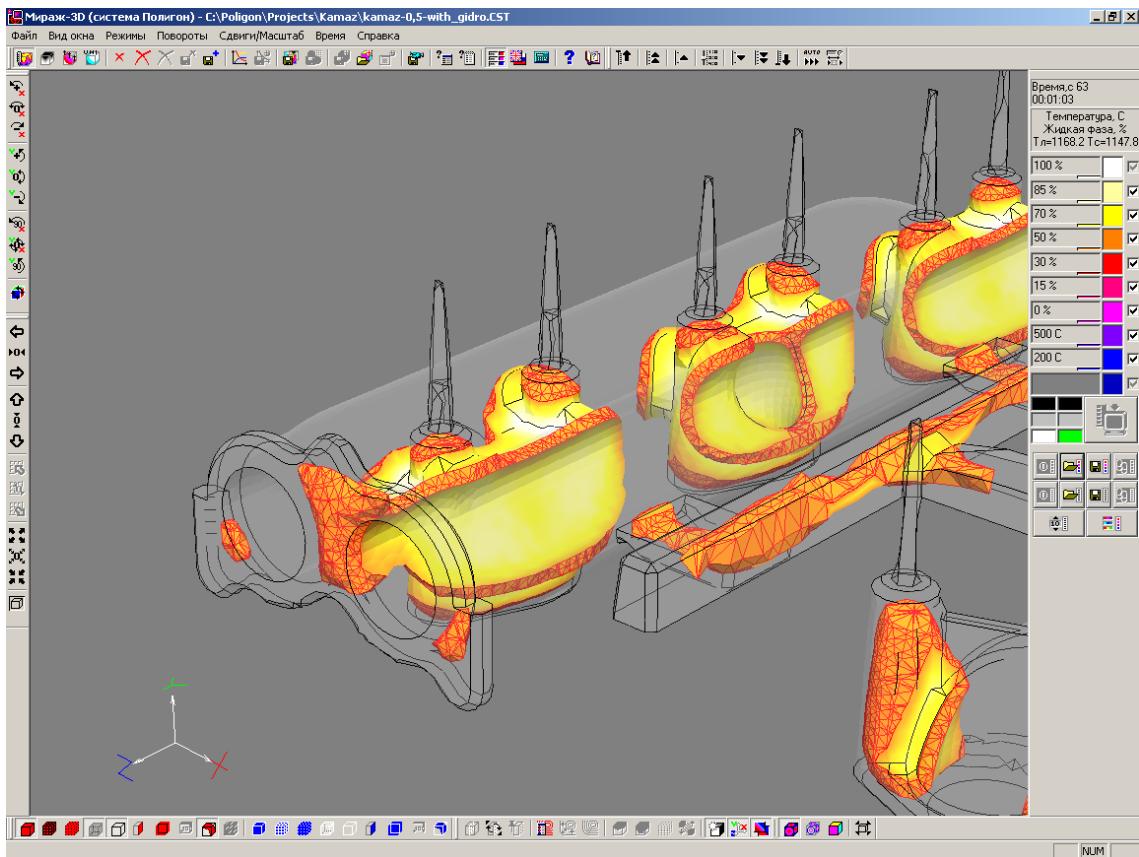
Рис. 2.7. Усадочные дефекты в теле отливки  
а – пористость выше значения изоповерхности в 5%;  
б – выше 50%;  
в – выше 90%



а



б



в

Рис. 2.8. Формирование дефектов в зоне тепловых узлов, прослеженное при помощи вывода зон выше значения изоповерхности в 50% жидкой фазы

- а – момент отрыва от питания ряда проблемных зон;  
 б – локализация объёмов жидкости в теле отливки, включён один из стандартных видов;  
 в – локализация объёмов жидкости в теле отливки, увеличенный фрагмент

### 3. Время, затрачиваемое на расчёт

Время, затрачиваемое на расчёт в процессорных модулях «Полигона» зависит от используемых вычислительных ресурсов, количества элементов в КЭ-модели. За счёт назначения различного размера конечного элемента в различных частях отливки (формы), в зависимости от их конфигурации, толщины, достигается сокращение количества элементов в модели, следовательно, и времени счёта. Также нет ощутимых задержек при выполнении различных операций по визуализации такой КЭ-геометрии (поворот, рассечение и т.д.) и при просмотре результатов расчётов.

На современном компьютере (Р-IV, 512ОЗУ) время счёта тепловой задачи, сопряжённой с расчётом усадочных дефектов, для исследуемой отливки составляет 30 – 40 мин. Гидродинамический расчёт занимает заметно большее время. Время счёта гидродинамики для исследуемой отливки составило около 3-х суток.