

УТВЕРЖДАЮ

16 января 2004 г.

\_\_\_\_\_  
Сабиров Д.Х.  
директор ООО «ФОКАД»

**Отчёт о моделировании литейной технологии для  
отливки «Рамка наружная» в системе моделирования литейных  
процессов «Полигон»**

Исполнитель:

ООО «ФОКАД»

инженер

Бройтман О.А.

Заказчик:

ОАО «Туламашзавод»

Санкт-Петербург  
2004

## 1. Постановка задачи

Ставилась задача по моделированию литейной технологии для отливки «Рамка наружная». Отливка изготавливается литьём по выплавляемым моделям, 8 отливок на кусте. Необходимо было оценить возможность получения здоровой отливки при существующей технологии, выявить места, в которых возможны усадочные дефекты.

Отливка изготавливается из стали марки 09Х16Н4БЛ, температура заливки 1580 – 1600°С. Формы прокаливаются в опоке (размеры опоки 520х220х400) при температуре 900°С, засыпка по 10 шт. в одной опоке. Время до заливки форм металлом после выемки форм из прокаточной печи – около 10 мин.

## 2. Этапы моделирования

Первоначально в CAD-системе SolidWorks была построена геометрическая модель отливки и формы. Собранный вариант показан на рис. 2.1. Расчёты проводились для одного куста, т.е. для 1/10 части опоки с оболочками. Ниже будет пояснено, как учитывалось влияние соседних залитых форм на исследуемый куст.

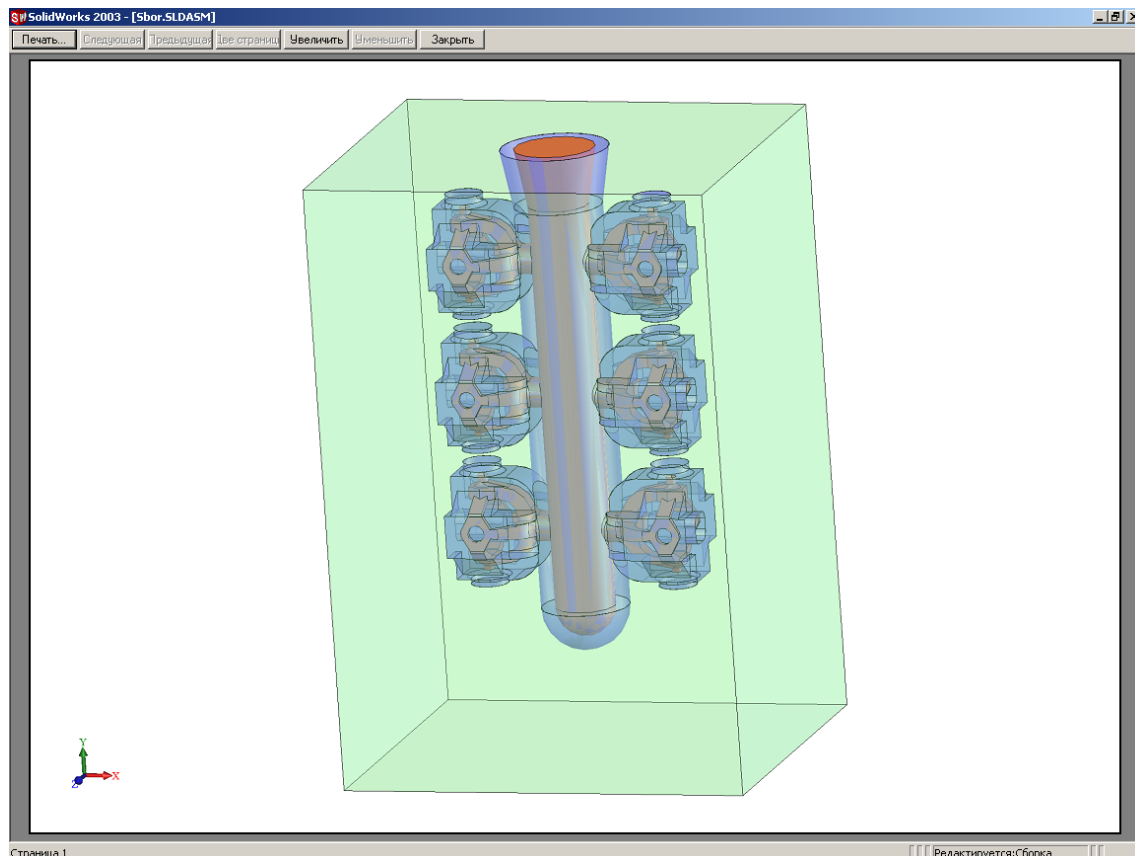
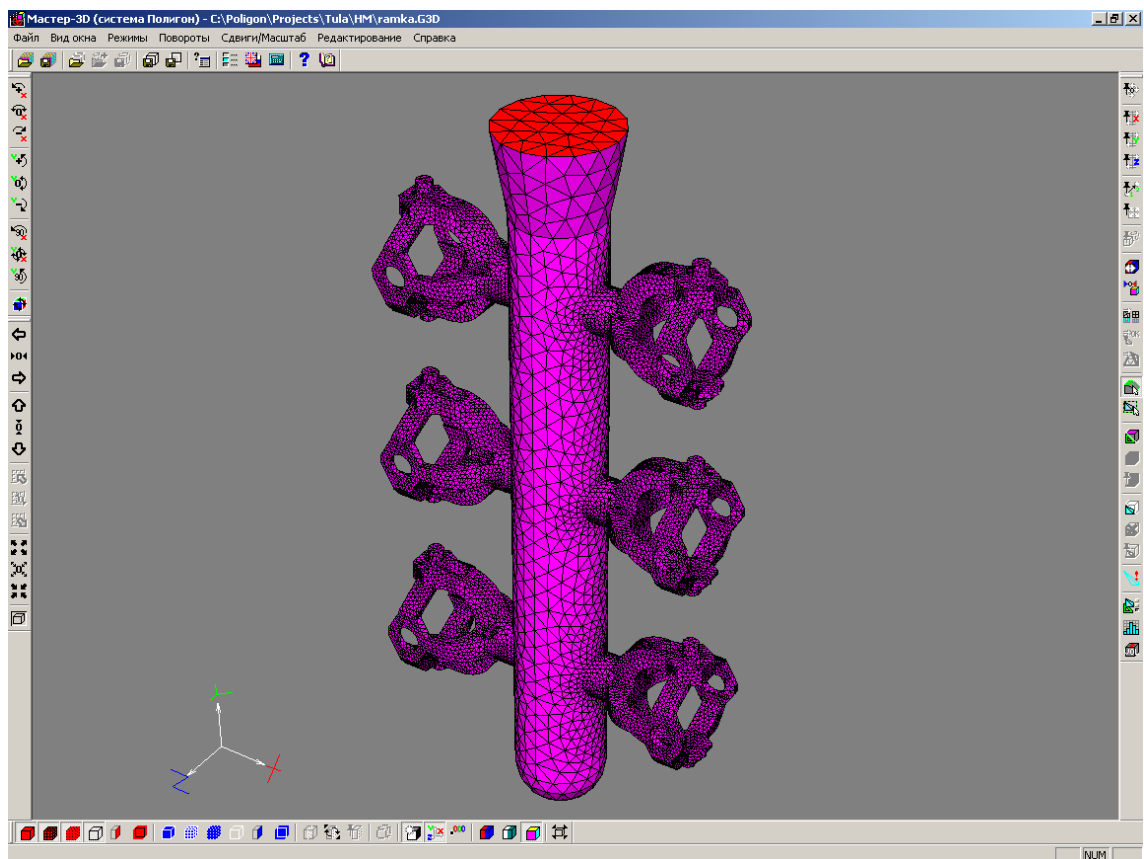
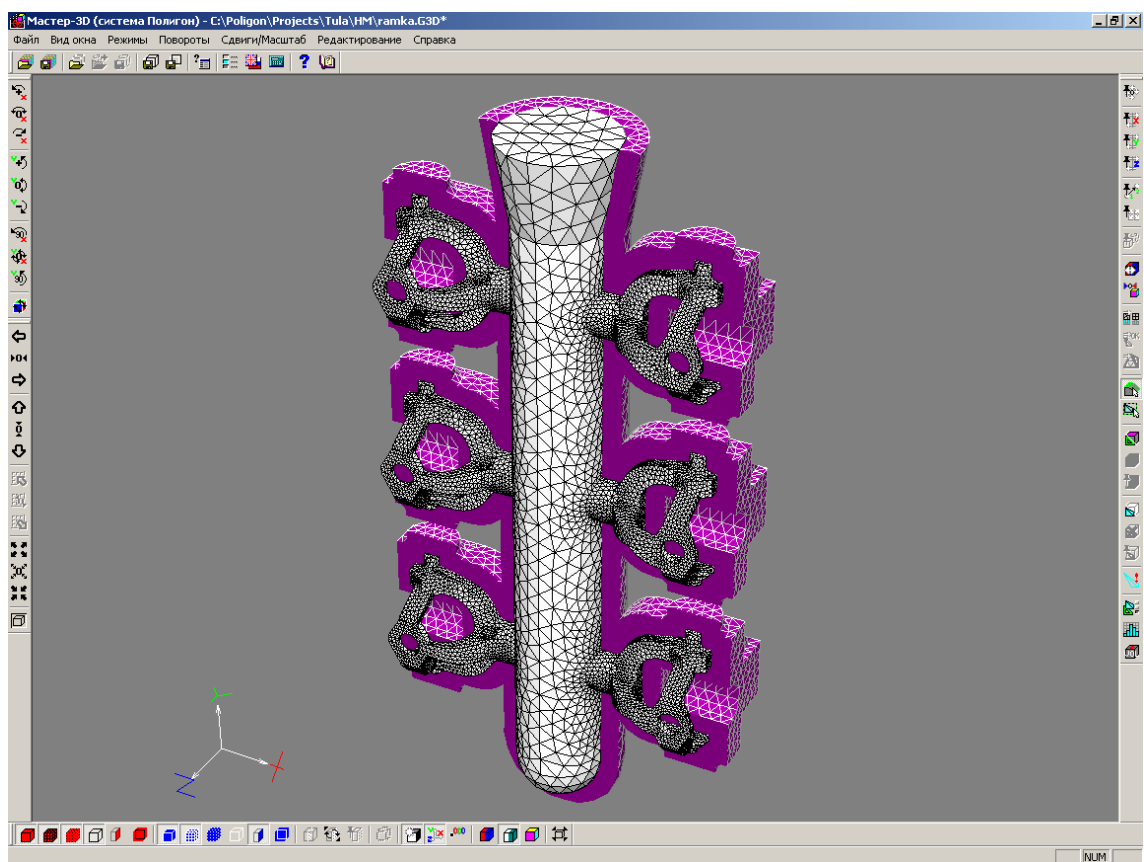


Рис. 2.1. Геометрическая модель, направляемая на генерацию КЭ-сетки

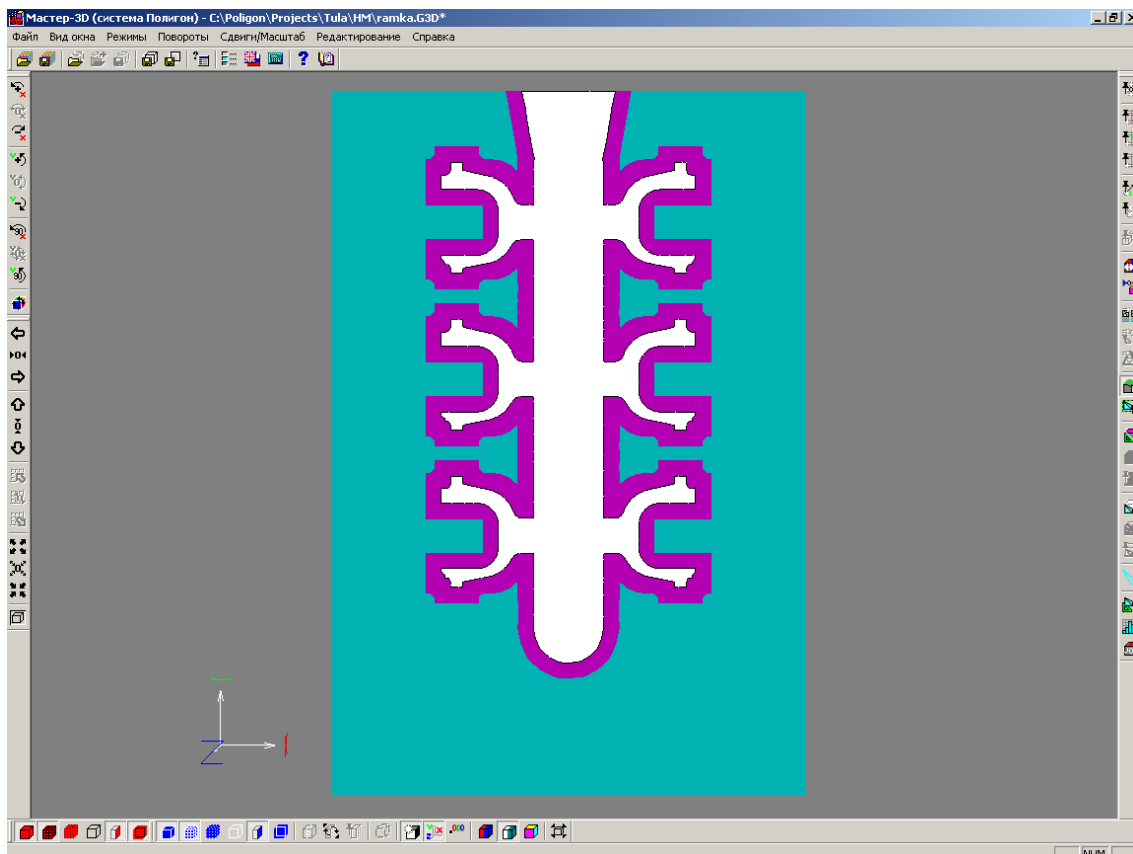
На следующем этапе для имеющегося геометрического образа объекта моделирования была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка в объёме отливки и во всех объёмах формы (оболочка и засыпка). Полученная КЭ-сетка была импортирована в систему компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон». В препроцессоре системы «Полигон» импортированная сетка редактировалась – модель ориентировалась в пространстве относительно вектора силы тяжести, назначались индексы границ и объёмов, производилась диагностика качества сетки, её автоматическая оптимизация и правка. Подготовленная конечно-элементная сетка затем передавалась в расчётный модуль – собственно процессор системы «Полигон». Полученные расчётные геометрические модели представлены на рис. 2.2.



a



б



В

Рис. 2.2. Геометрические КЭ-модели

а – модель отливки (форма скрыта);

б – отливка, заключённая в оболочку (оболочка показана в сечении, опока скрыта);

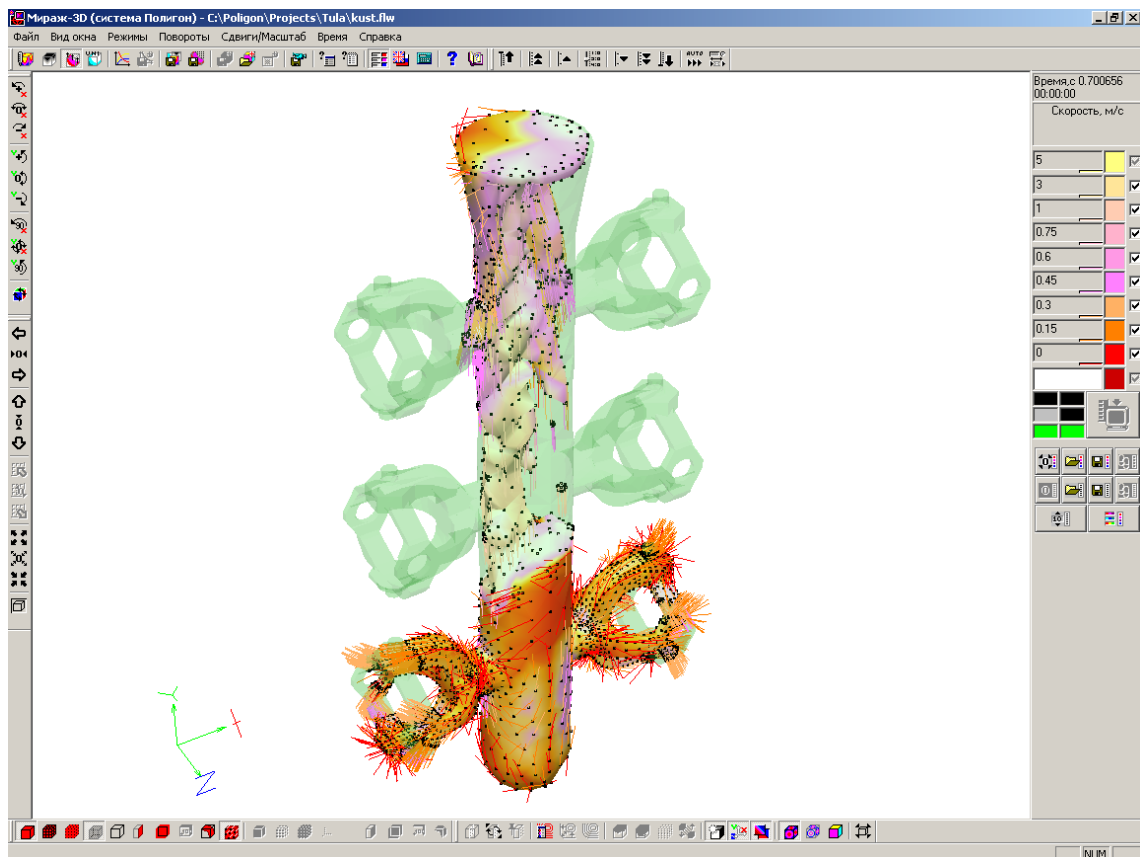
в – полная модель (показано характерное сечение)

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

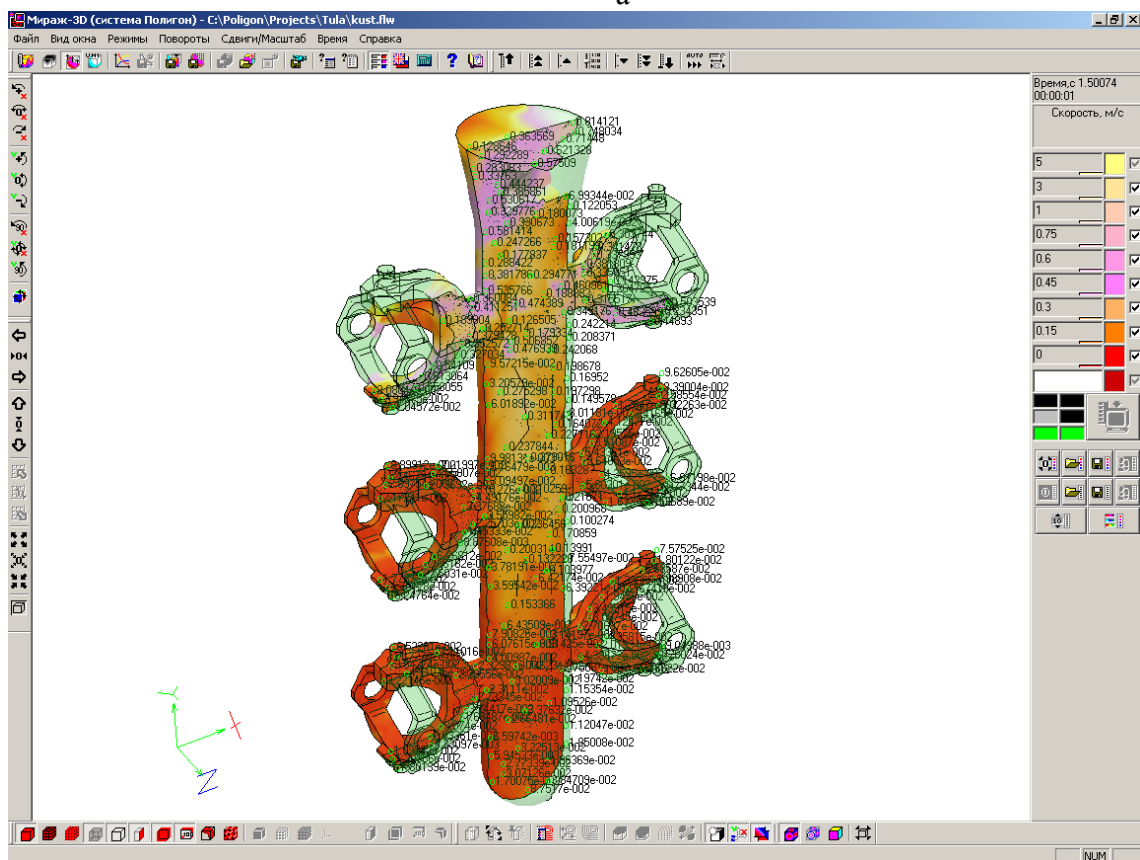
Расчёт затвердевания (тепловой расчёт, сопряжённый с усадочным) предваряется гидродинамическим расчётом. По результатам гидродинамического расчёта технолог прослеживает поле скоростей (рис. 2.3) на протяжении процесса течения металла в полости формы (в том числе – в пристеночном слое, что важно с точки 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 пронаблюдать 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. 2.4б), загружается как стартовое поле температур перед началом затвердевания в тепловом модуле «Полигона», что повышает адекватность моделирования.

Результаты гидродинамического расчёта можно затем пронаблюдать 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».

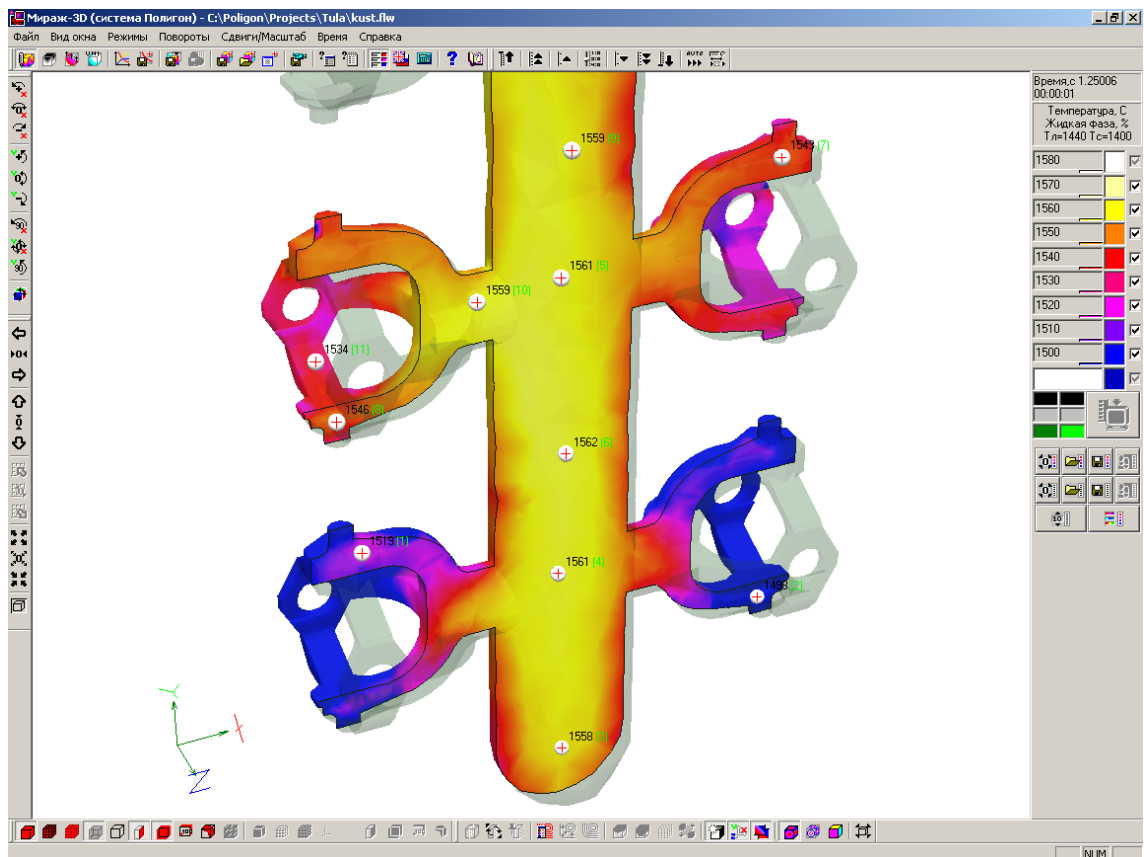


а

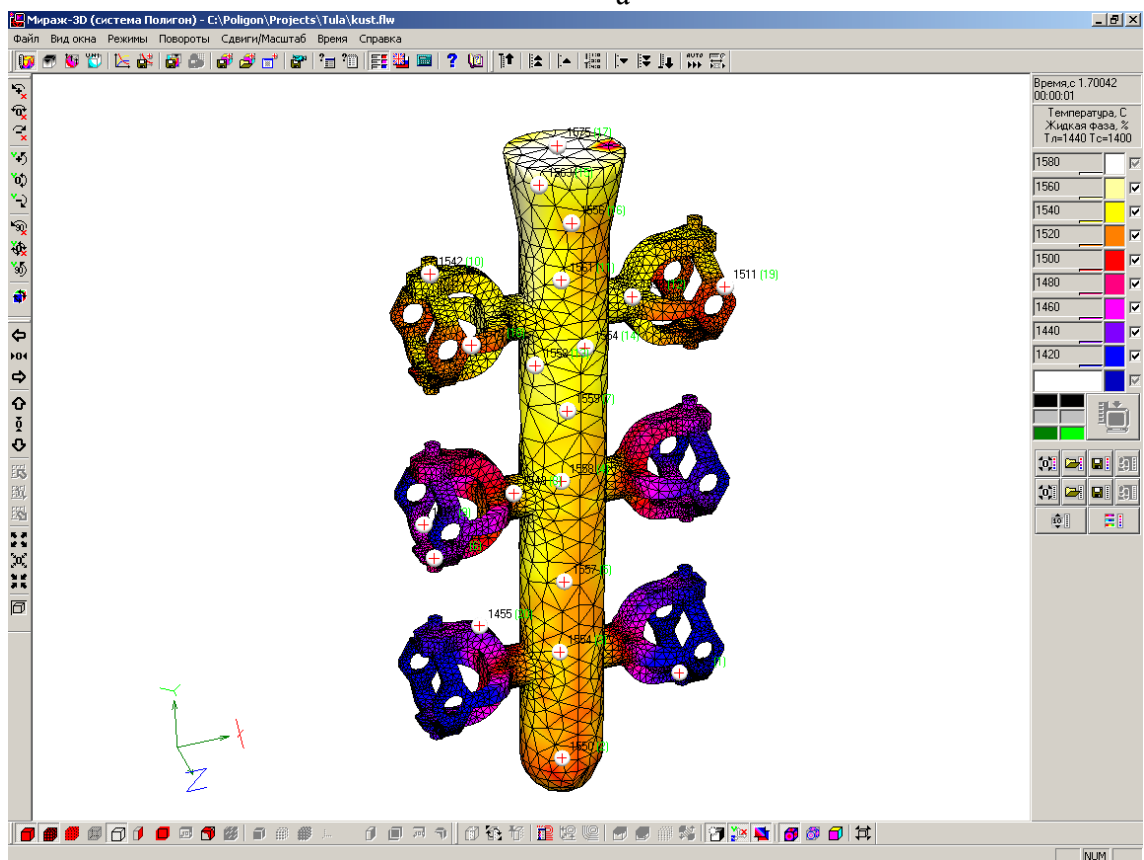


б

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)

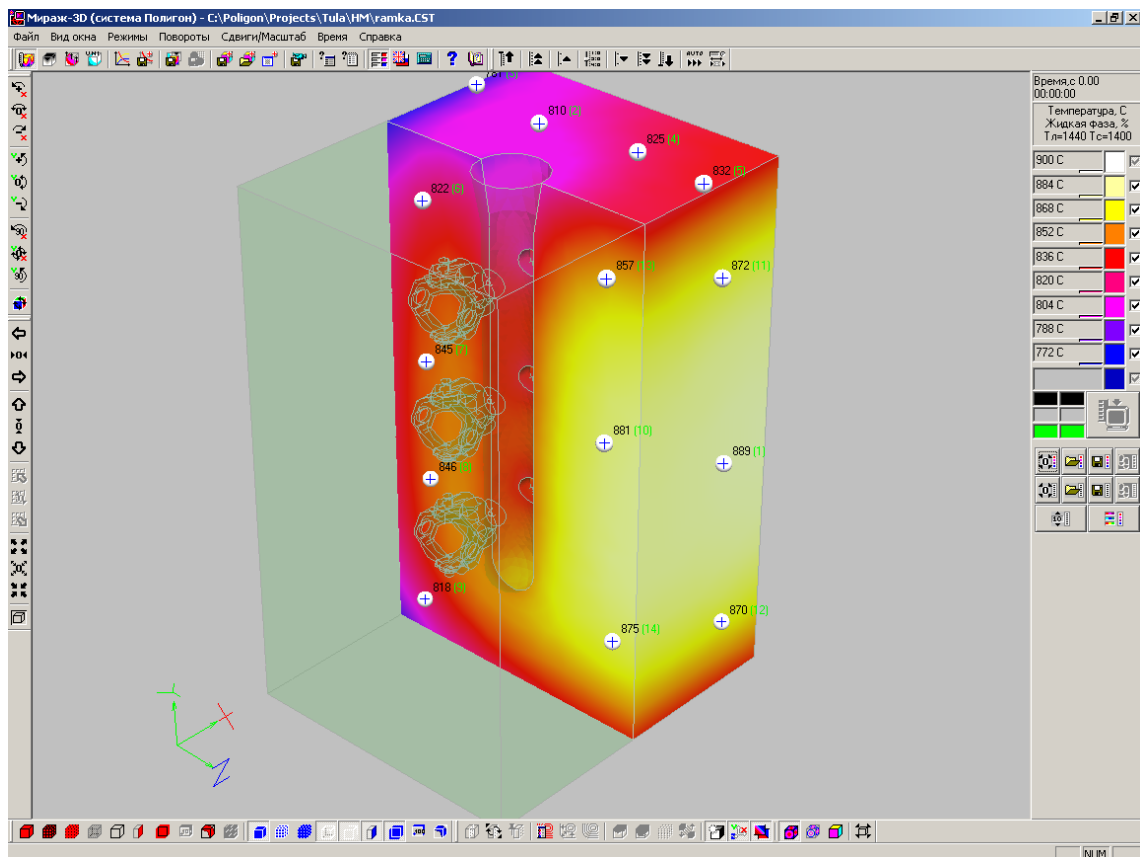


а

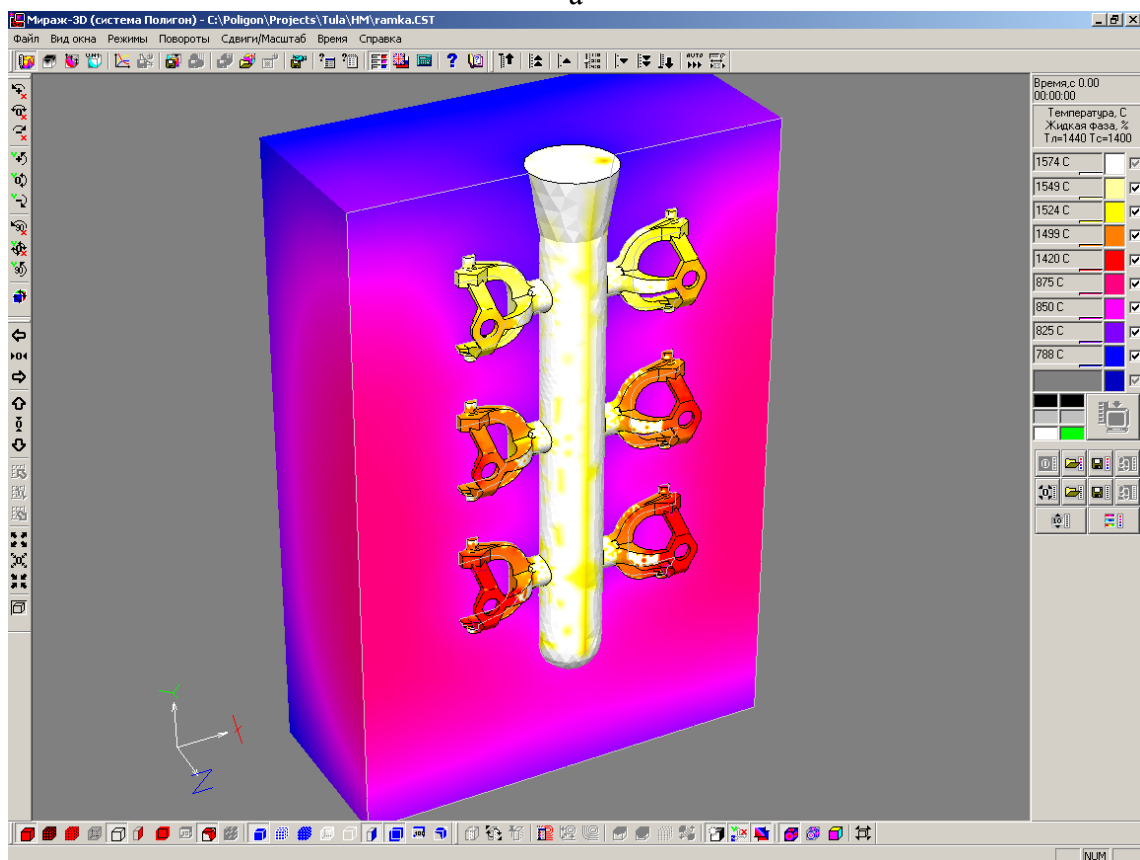


б

Рис. 2.4. Визуализация результатов гидродинамического расчёта (температуры)  
а – промежуточная стадия заполнения (изображение увеличено, отображено сечение, отмечено несколько точек, в которых показана температура);  
б – поле температур в теле отливки по окончании заливки



а



б

Рис. 2.5. Стартовое поле температур перед запуском расчёта затвердевания  
а – температуры в сегменте формы перед заливкой (характерное сечение)  
б – температуры в отливке и форме после заливки (форма показана в сечении)

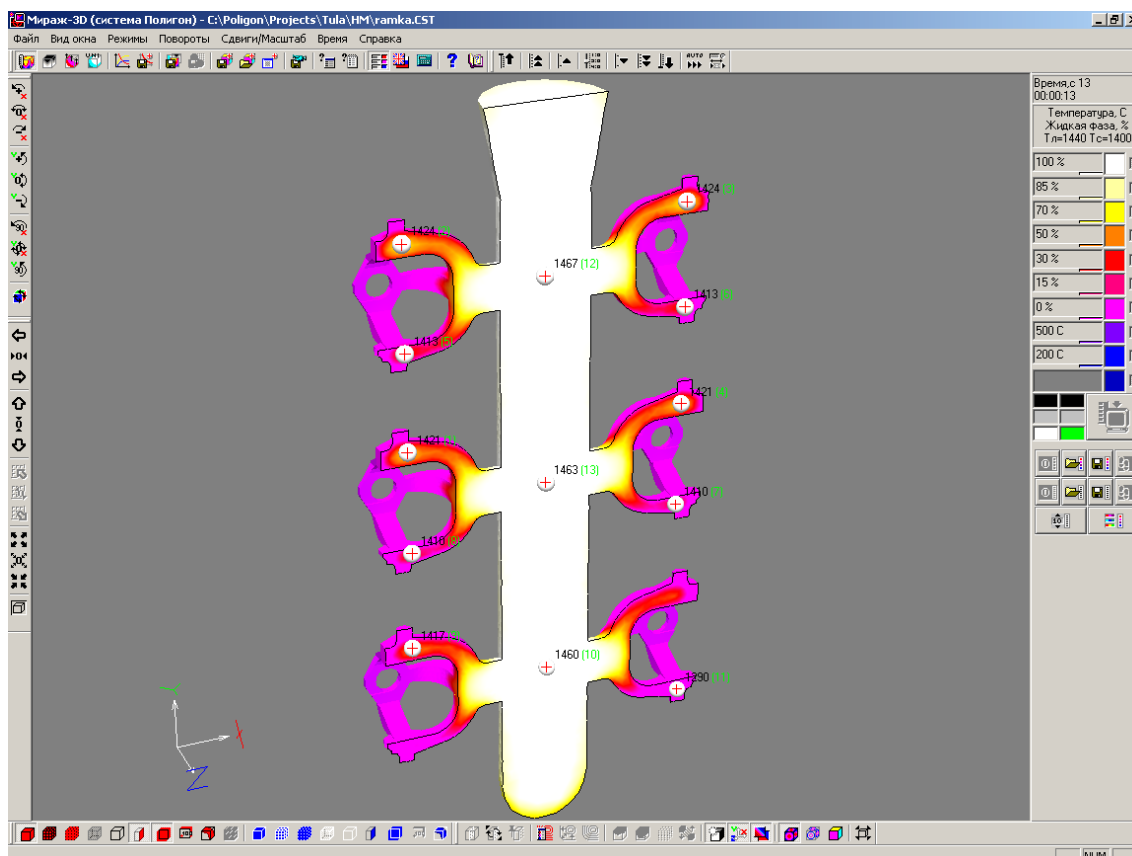


На рис. 2.3 и 2.4 различные части отливки окрашены в разные цвета, согласно принятой шкале скоростей (рис. 2.3) либо температур (рис. 2.4) и присвоенных различным скоростям (температурам) цветов, которые соответствуют определённым значениям скорости (температуры) в тех или иных местах отливки. Шкала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

По условиям технологического процесса, равномерно прогретые оболочки с опоками около 10 мин. находятся на воздухе после выемки из печи. Считая, что температура окружающей среды 20°C произведён был расчёт охлаждения формы в течение 10 мин от начальной температуры в 900°C. Затем это сложное поле температур в форме было загружено в качестве начального на расчёт затвердевания (рис. 2.5а). Из рис. 2.5а видно различие в температурах между, слоями формы, граничащими с окружающей средой и слоями, по которым данный сегмент формы симметричен окружающим.

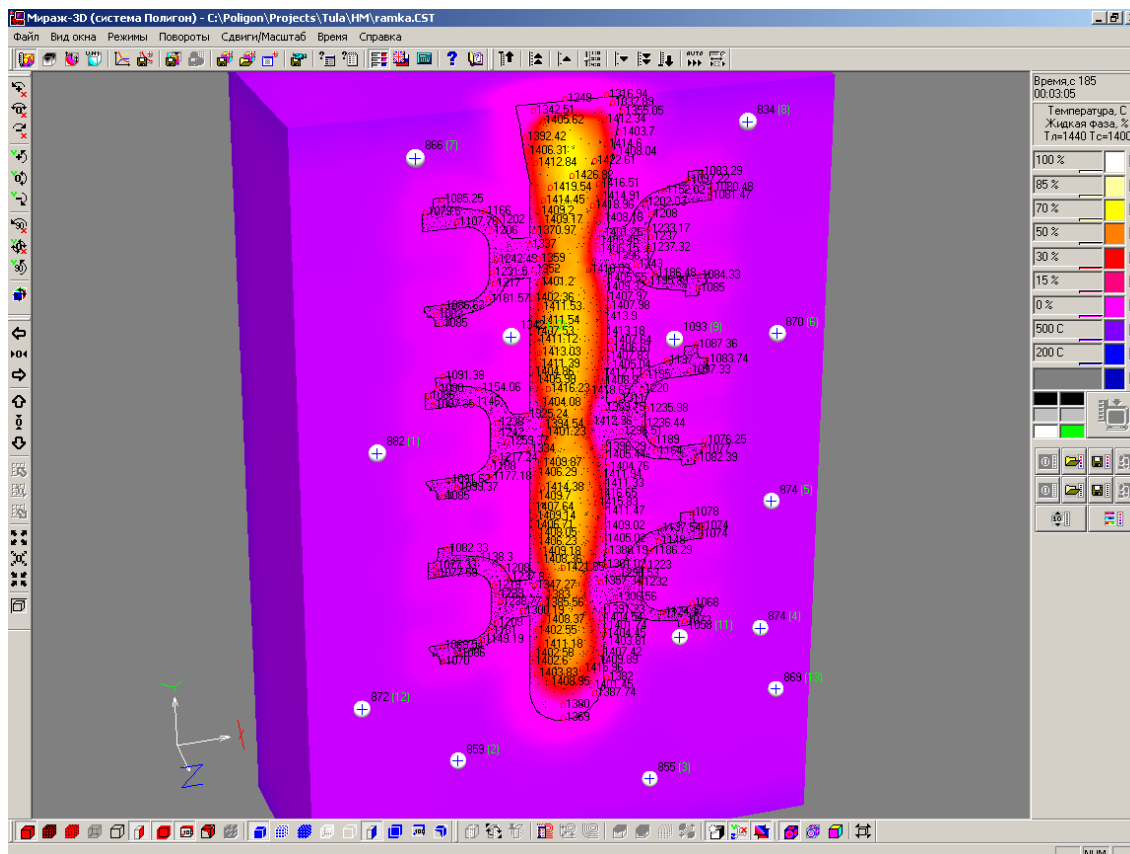
Следующим этапом стала, собственно, серия расчётов затвердевания, сопряжённых с расчётом усадочных дефектов. Учитывая, что расчёты производились для части формы, по тем поверхностям, где вырезанный элемент граничит с оставшейся частью опоки, был назначен нулевой коэффициент теплопередачи, т.е. задано отсутствие теплоотвода в среду по указанным поверхностям формы (см. рис. 2.5а). На рис. 2.5б показано температурное поле в отливке и форме, которое явилось стартовым перед расчётом. Следует обратить внимание на то, что для корректного отображения температурного поля в отливке и форме на одном рисунке выбрана неравномерная шкала.

Одним из вариантов визуализации результатов расчёта является просмотр изменения температурного поля в отливке (рис. 2.6). Можно произвести любое сечение, проследить 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.



а





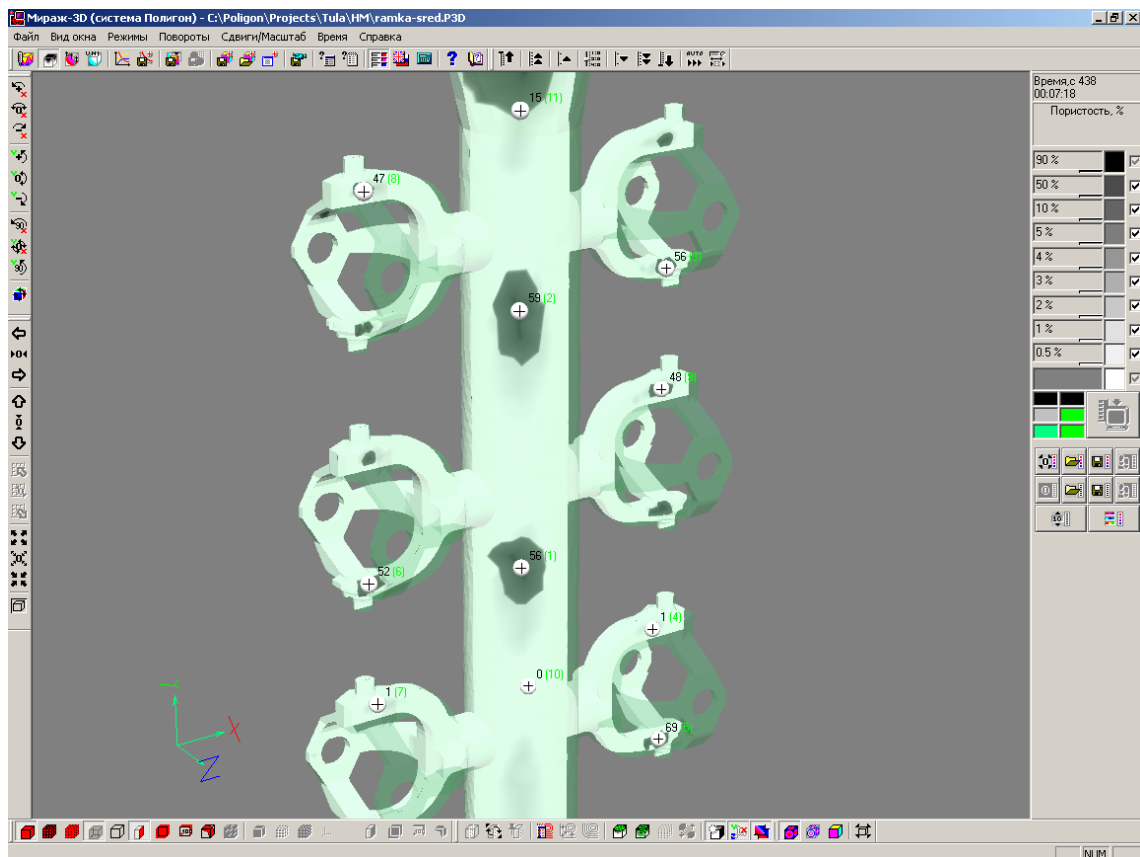
б

Рис. 2.6. Поля температур в процессе затвердевания в характерном сечении отливки  
 а – одна из промежуточных стадий затвердевания (видно формирование тепловых узлов в каждой отливке, расположенной на кусте, показаны температуры в нескольких точках);  
 б – завершающая стадия затвердевания (включена оцифровка сечения отливки, показаны температуры в нескольких точках по сечению формы)

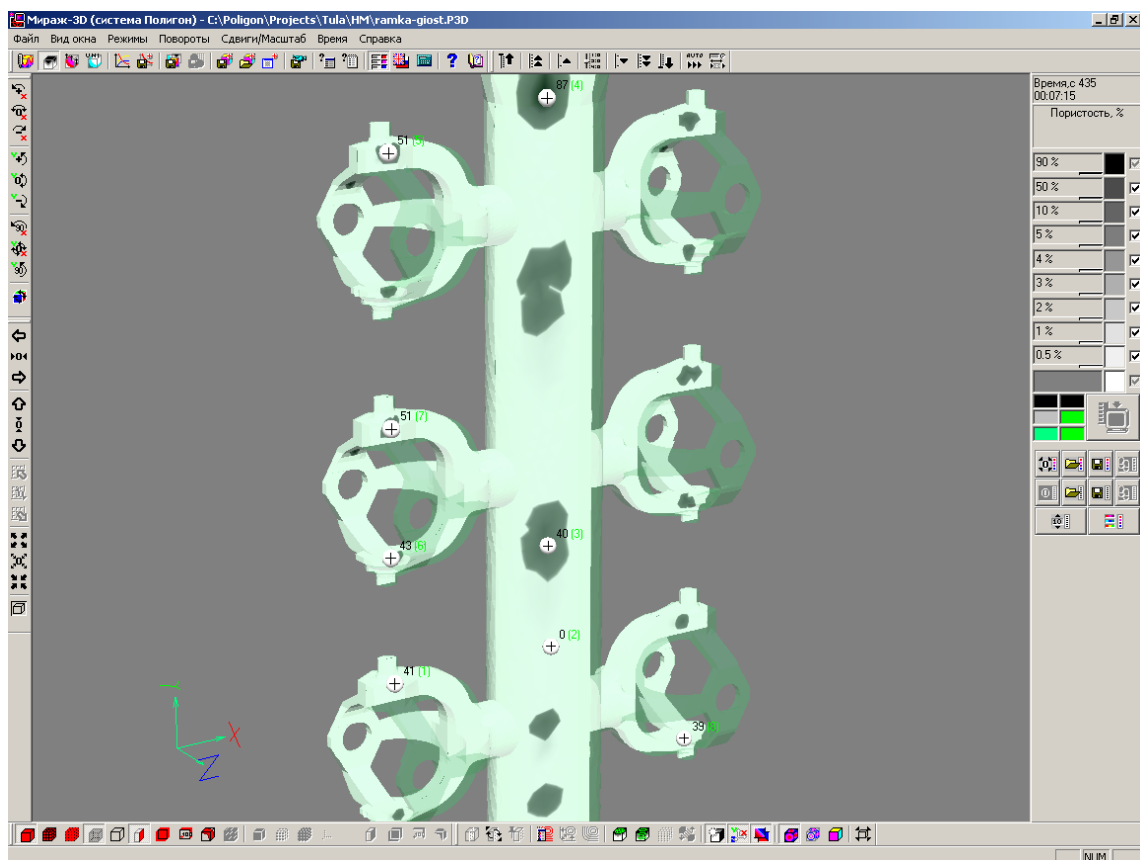
Результаты расчёта усадочных дефектов приведены на рис. 2.7 и 2.8.

Здесь необходимо ввести понятие об используемой в «Полигоне» модели о сложной структурированности двухфазной зоны. В «Полигоне» 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.

На рис. 2.7 не показаны результаты расчёта на «мягких» условиях по усадке, поскольку для этого случая визуализация через сечения недостаточно эффективна при сохранении неизменной шкалы (что здесь необходимо для корректного сравнения всех трёх вариантов расчёта). Результаты расчёта на «мягких» условиях показаны через изоповерхности на рис. 2.8а.

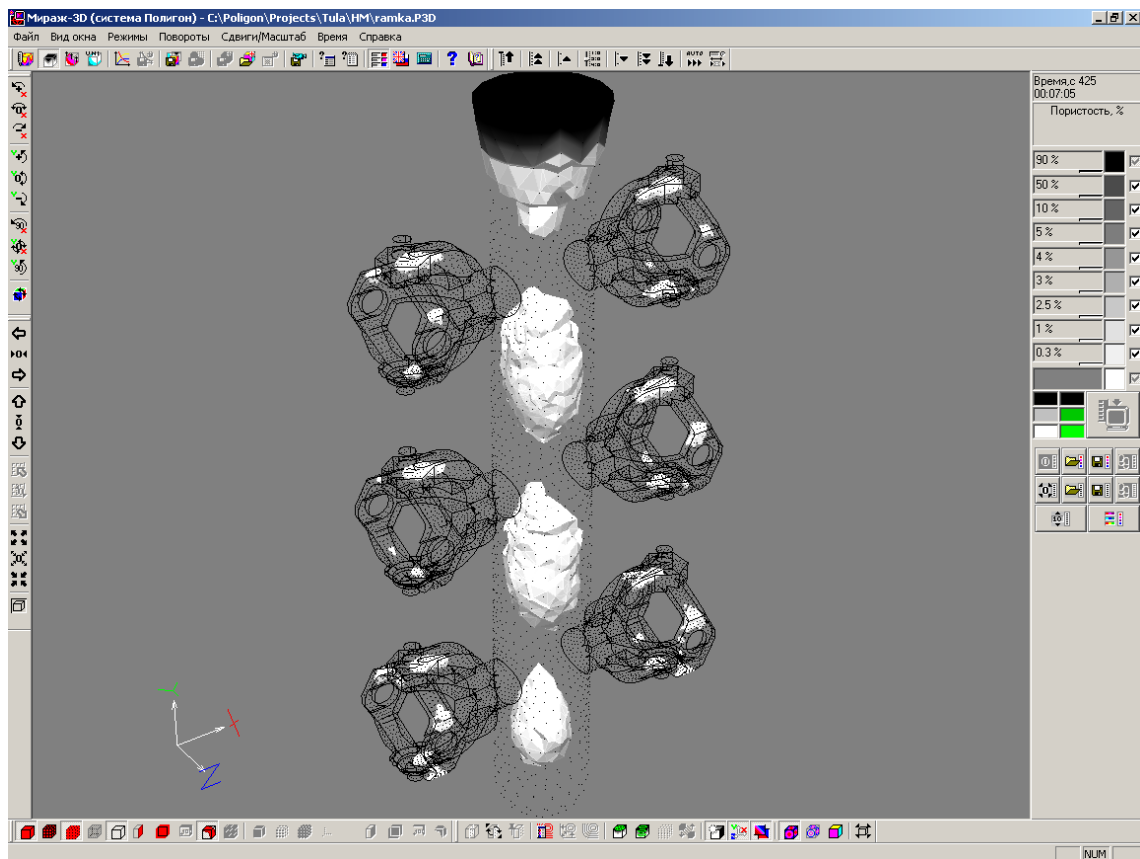


а

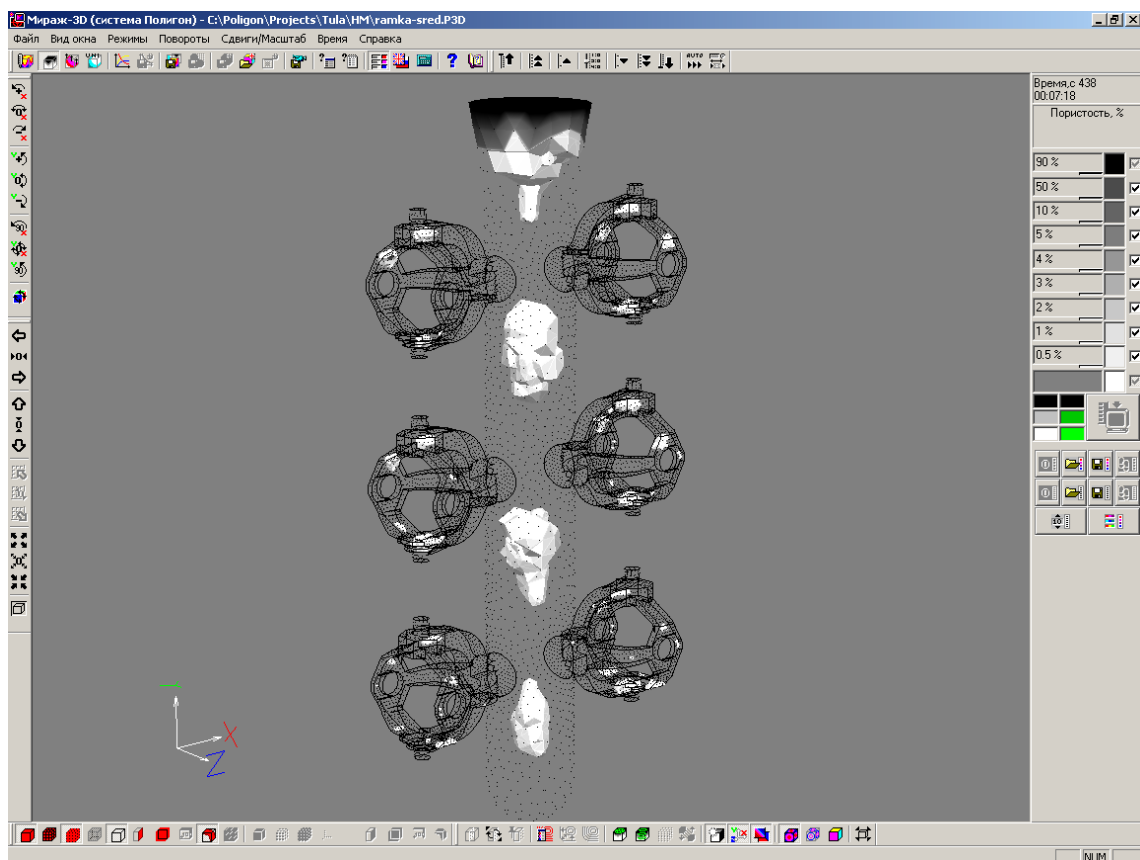


б

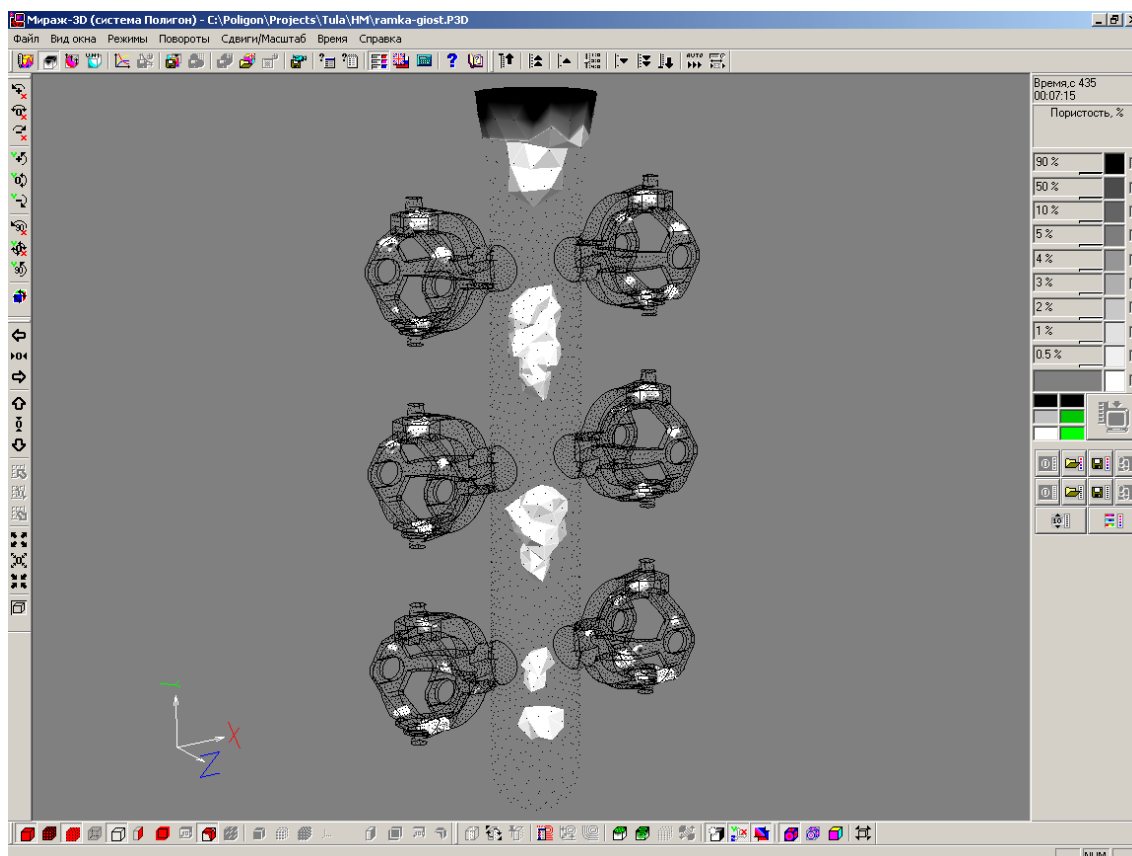
Рис. 2.7. Усадочные дефекты в теле отливки (сечение)  
а – при задании «средних» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,33$ ;  
б – при задании «жестких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$



a



б



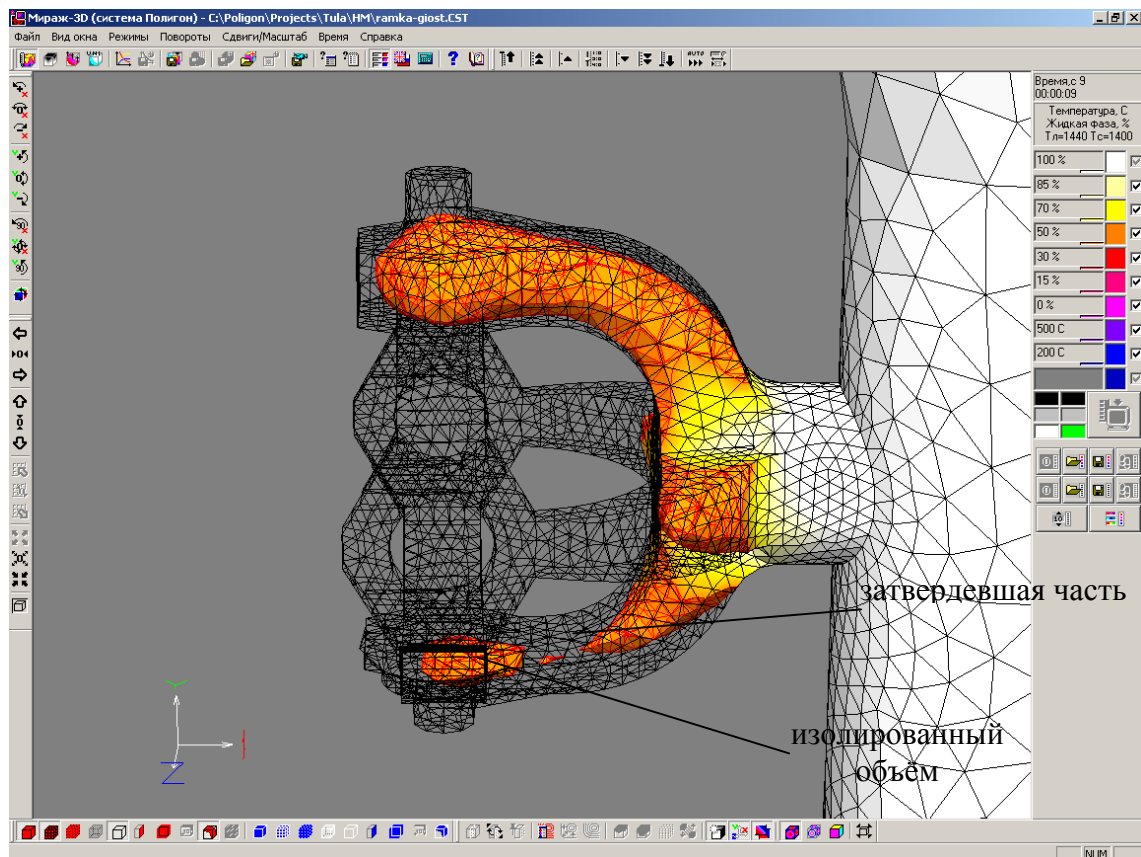
В

Рис. 2.8. Усадочные дефекты в теле отливки

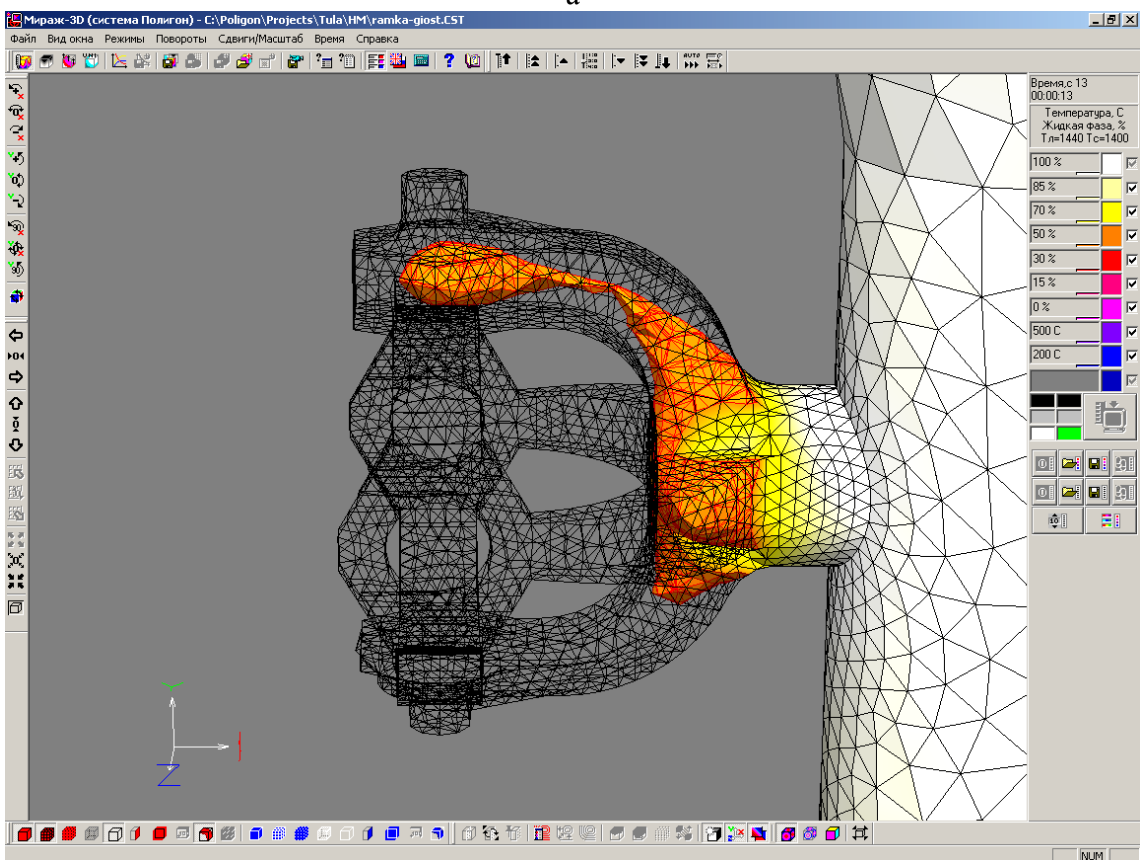
- а – при задании «мягких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,25$ ,  $P_3=0,10$  (пористость выше значения изоповерхности в 0,5%);
- б – при задании «средних» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,33$  (выше 1%)
- в – при задании «жестких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$  (выше 1%)

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: на экране не отображаются уже затвердевшие части отливки, наблюдаем лишь те, в которых есть жидкая фаза.

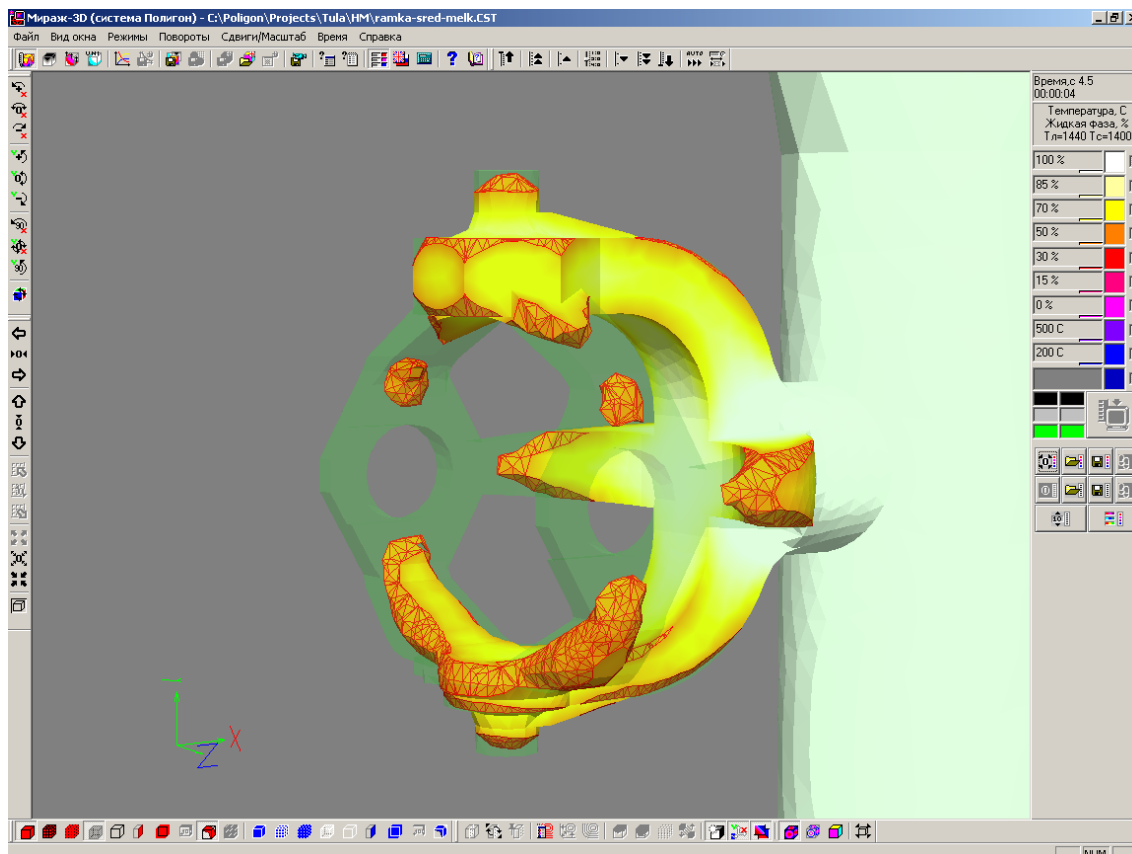
На рис. 2.9 выведены зоны выше определённого значения изоповерхности для иллюстрации процесса образования изолированного объёма жидкости. Очевидно, что при данной технологии толщины питателей недостаточны, чтобы пропитать массивные элементы отливки, а в рамке вблизи шестигранника с отверстием формирование дефекта обусловлено конструктивными особенностями.



а



б



В

Рис. 2.9. Формирование дефектов в зоне тепловых узлов, прослеженное при помощи вывода зон выше значения изоповерхности в 50% жидкой фазы. Показан момент отрыва неблагоприятной зоны от питания  
а – в нижнем шестиграннике;  
б – в верхнем шестиграннике;  
в – вблизи шестигранника с отверстием

### 3. Выводы по результатам моделирования

1. Анализ результатов гидродинамического расчёта позволяет сделать вывод о том, что заполнение происходит спокойно, резких перепадов скоростей в полости формы не наблюдается. В соответствии с этим и перепады температур в отливке по окончании заполнения невелики.
2. Анализ результатов расчётов по предложенной технологии (рис. 2.2в) выявил неизбежное возникновение рыхлот (пористость до 60%) в массивных частях отливки. Существует вероятность получения рыхлоты и в районе боковых шестигранников с отверстиями.