

УТВЕРЖДАЮ

11 июля 2006 г.

_____ Комаров И.А.
директор ООО «ФОНДРИКАД»

**Отчет о моделировании литейной технологии для
отливки «Моноблок», чертеж 15М.04.141
в системе моделирования литейных процессов «Полигон»**

Исполнитель:

ООО «ФОНДРИКАД»

тех. директор

Бройтман О.А.

Заказчик:

ОАО «Звезда»

Санкт-Петербург
2006

1. Постановка задачи

Ставилась задача по моделированию литейной технологии для отливки «Моноблок». Необходимо было оценить возможность получения здоровой отливки при существующей технологии, исследовать работу литниковой системы, процесс питания при затвердевании, выявить места, в которых возможны усадочные дефекты, выявить зоны, механические свойства которых не являются удовлетворительными согласно требованиям сдаточного контроля.

Отливка изготавливается из алюминиевого сплава марки АК9ч, температура заливки 770°C, литьё в комбинированную форму на песчаной основе с чугунными холодильниками. Затвердевание протекает в автоклаве (давление 5 атм.).

2. Этапы моделирования

Предоставленные Заказчиком модели отливки и всех элементов литейной формы, построенные в CAD-системе SolidWorks, после небольшой корректировки (рис. 2.1) были направлены на генерацию конечно-элементной (КЭ) сетки. Для обеспечения экономичности тепловых расчётов (сокращение количества элементов в расчётной модели) геометрия представляла собой 1/4 часть отливки и формы, симметричную с отсечёнными частями. При этом учитывалось влияние отсечённых частей на исследуемую. «Полигон» позволяет производить такие экономичные расчёты путём назначения условия симметрии на плоскостях, по которым производилось отсечение. Задача заполнения полости формы расплавом решалась на полной геометрии.

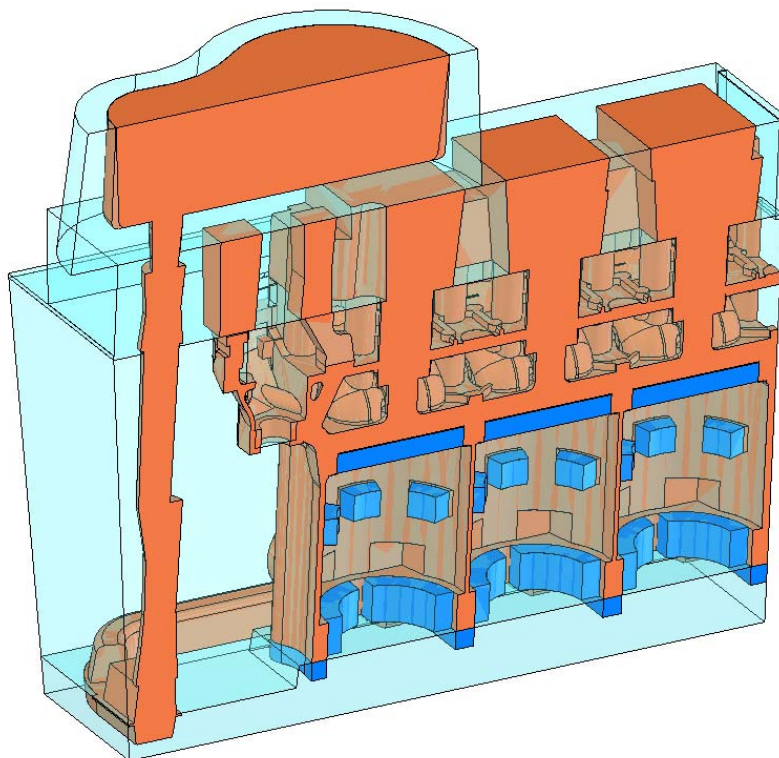
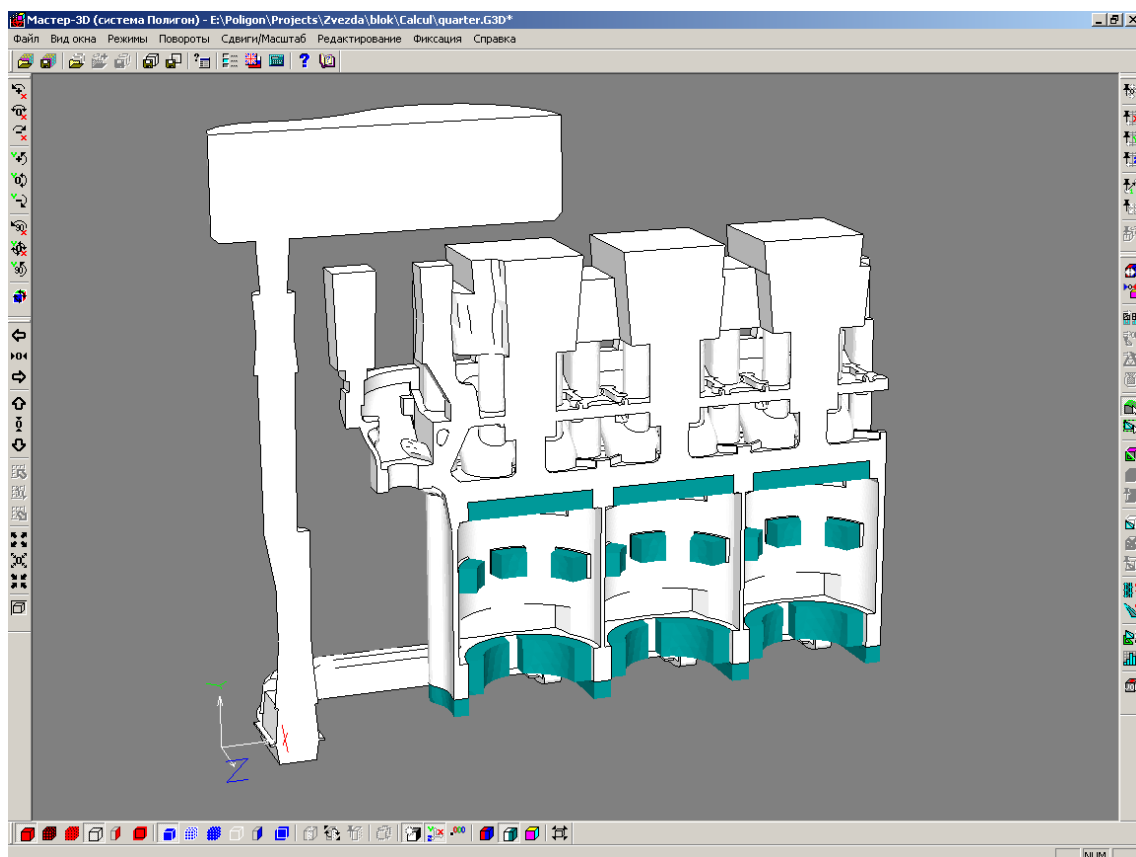


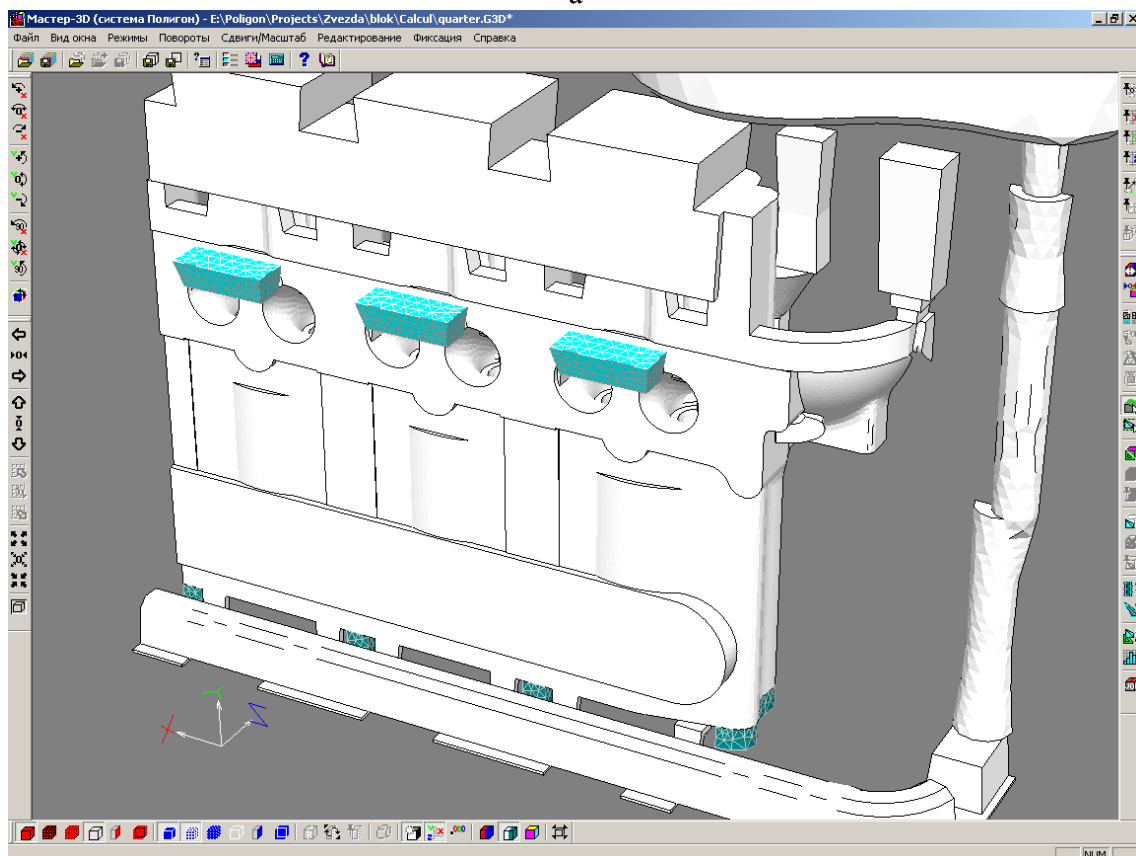
Рис. 2.1. Геометрическая модель, направляемая на генерацию КЭ-сетки

Для имеющегося геометрического образа объекта моделирования была сгенерирована КЭ-сетка в объёме отливки и во всех объёмах формы (элементы формы, изготовленные на песчаной основе, холодильники). 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

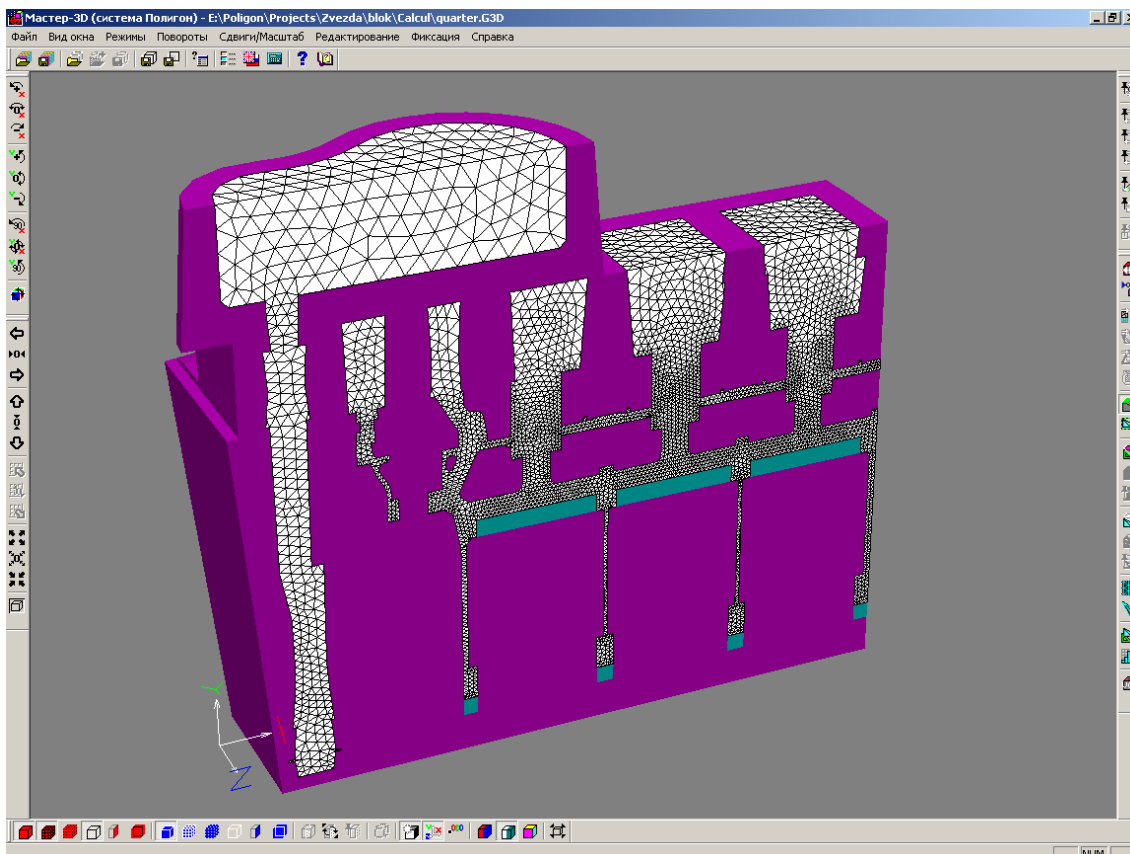
индексы границ и объёмов, производилась диагностика качества сетки, её автоматическая оптимизация и правка. Подготовленная конечно-элементная сетка затем передавалась в расчётные модули – собственно процессор системы «Полигон». Полученные расчётные геометрические модели представлены на рис. 2.2.



a



б

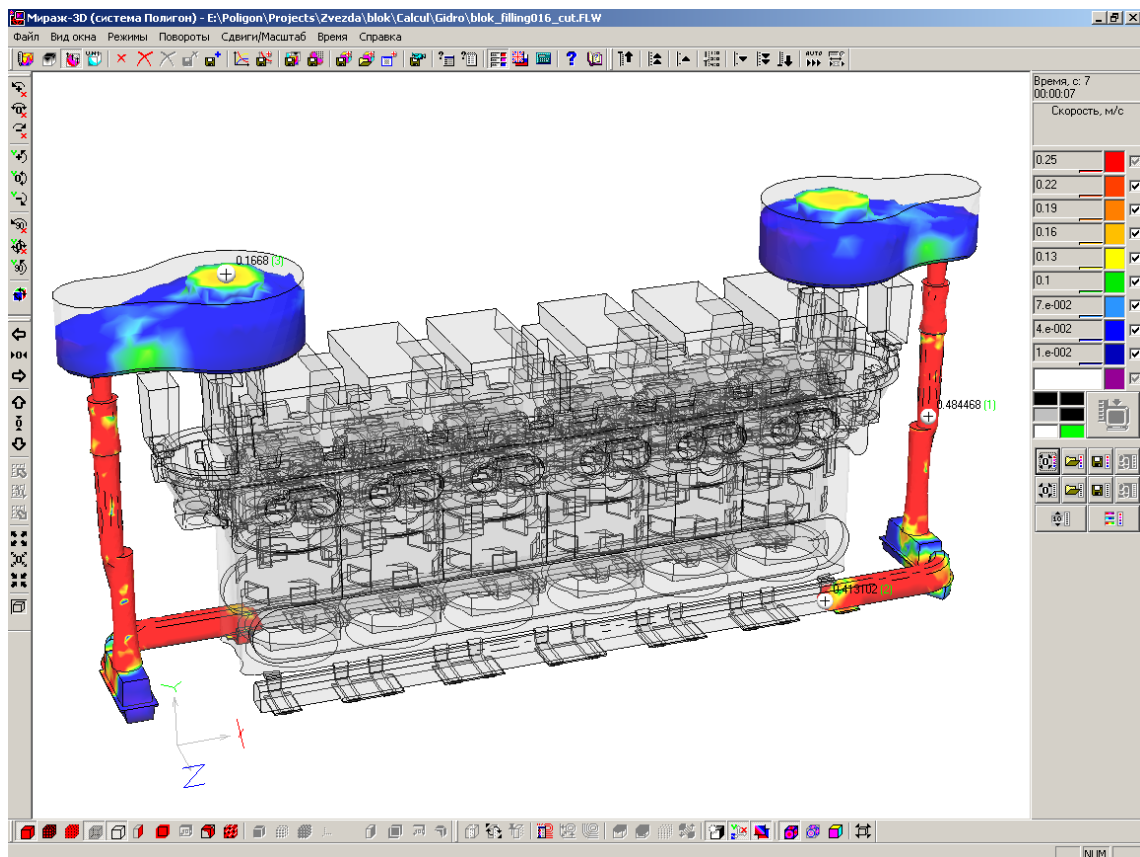


В

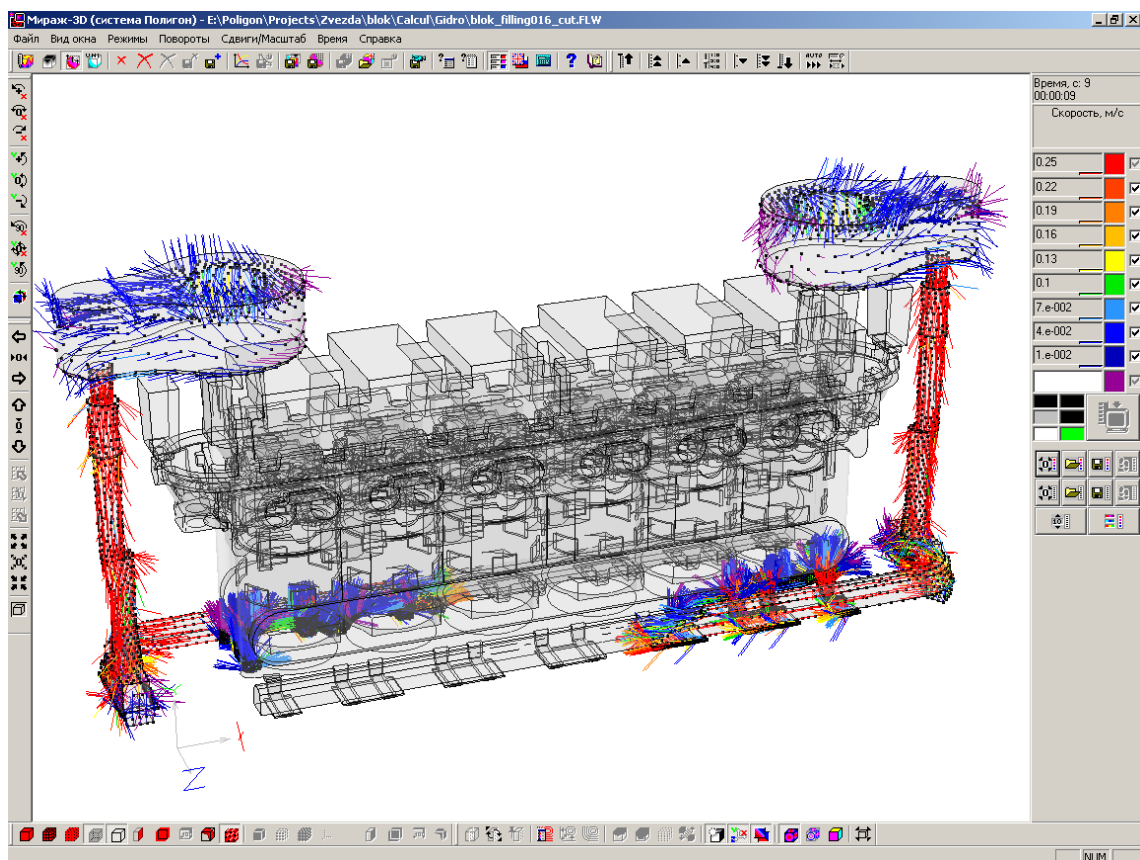
Рис. 2.2. Геометрическая КЭ-модель, различные ракурсы:
а, б – модель отливки (основная часть формы скрыта, показаны холодильники);
в – отливка в форме

Следующий этап – задание теплофизических свойств материалов отливки и формы, а также усадочных свойств сплава. Температурно-зависимые теплофизические свойства всех материалов формы и отливки, равно как и усадочные свойства сплава, были взяты из внутренней базы данных «Полигона».

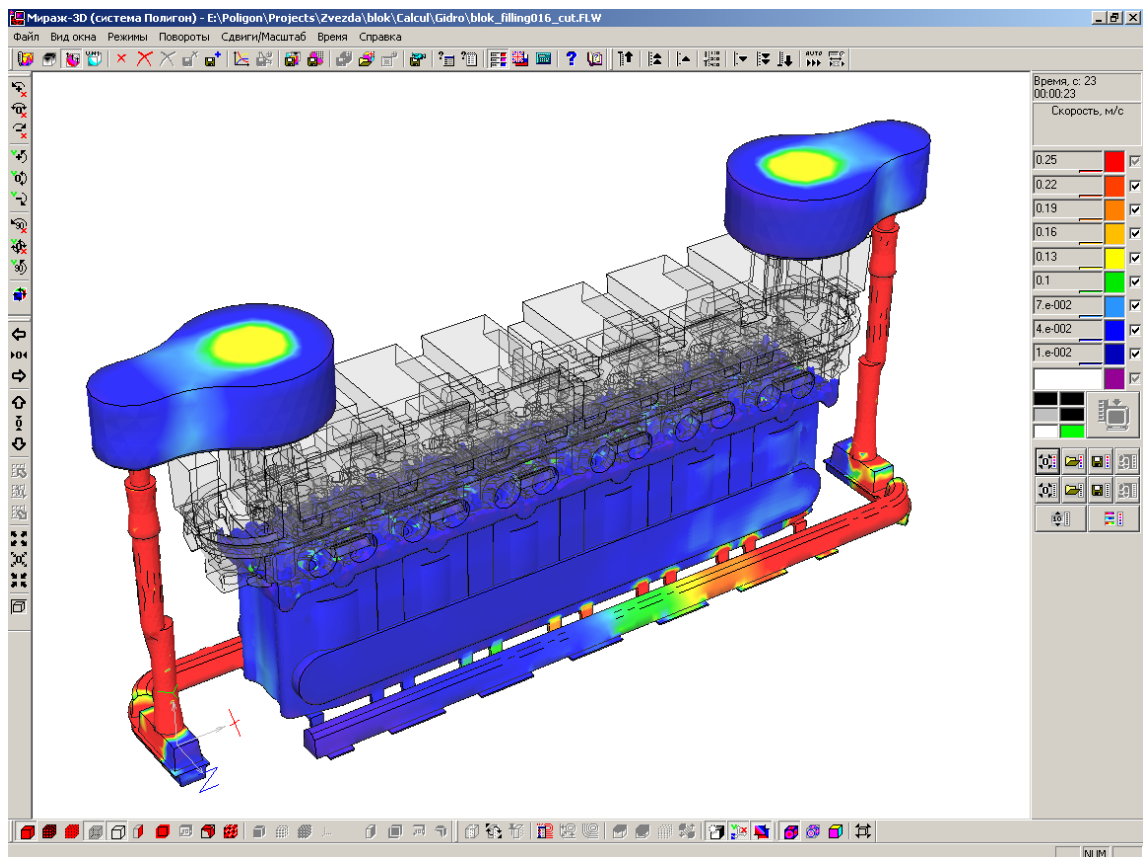
Расчёт затвердевания (тепловой расчёт, сопряжённый с усадочным) предваряли гидродинамическим расчётом. По результатам гидродинамического расчёта прослеживается поле скоростей (рис. 2.3) на протяжении процесса течения металла в полости формы (в том числе – в пристеночном слое, что важно с точки зрения оценки вероятности размыва, обнаружения застойных зон, завихрения потока, контроля скоростей течения и особенностей работы литниковой системы 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, выявить места остановки потока, получить поле температур по окончании заливки в отливке и форме и т.д.).



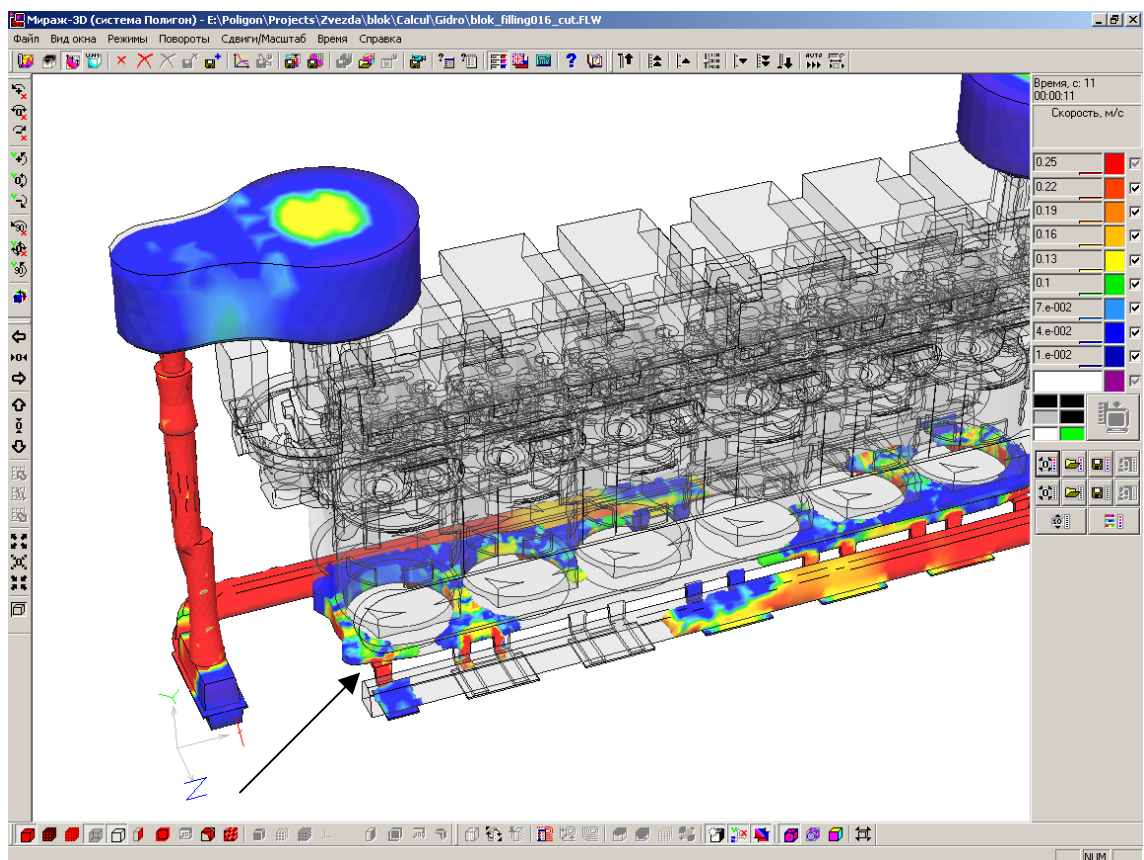
a



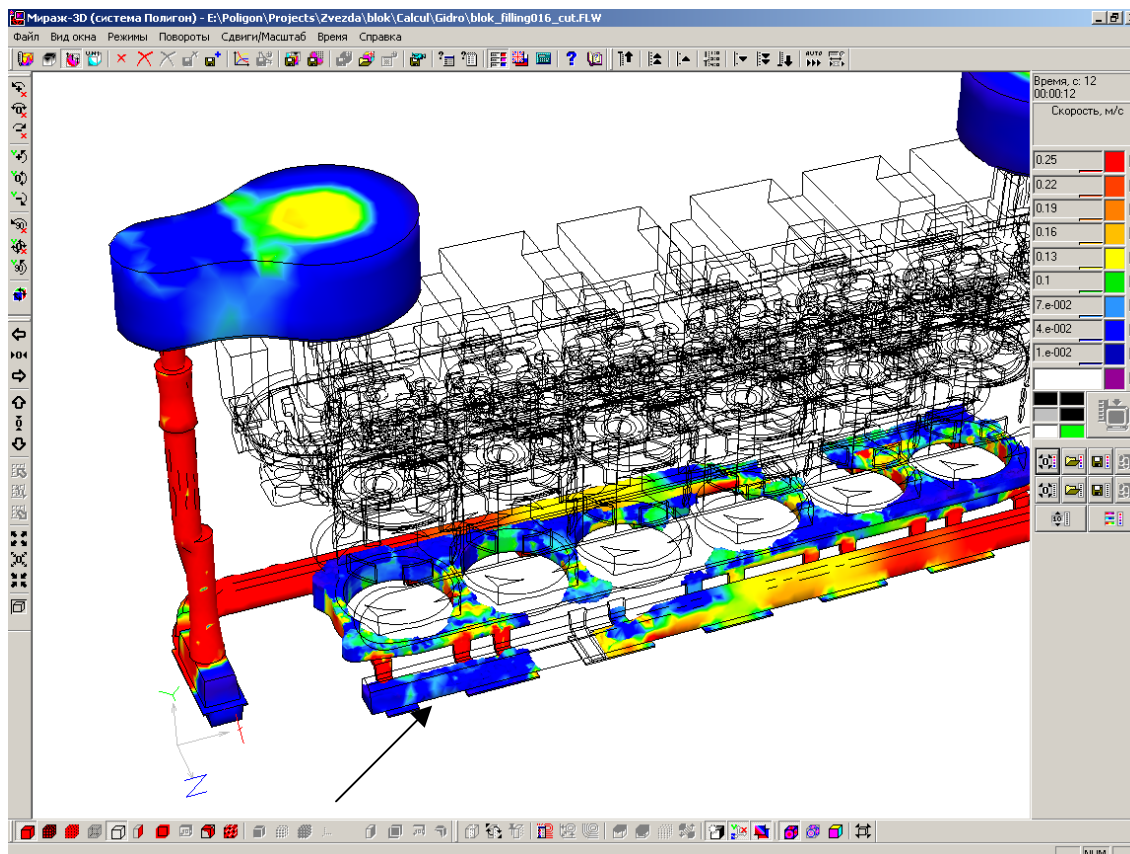
6



В



Г



Д

Рис. 2.3. Визуализация результатов гидродинамического расчёта (скорости)
а – начальная стадия заполнения (отмечено несколько точек, в которых показано значение скорости);
б – начальная стадия заполнения, включён показ векторов скоростей;
в – промежуточная стадия заполнения;
г, д – особенности работы литниковой системы

На рис. 2.3, б включён показ векторов скоростей. Этот режим визуализации позволяет пронаблюдать не только модуль скорости при заполнении, но и направление движения потока в том или ином месте. Таким образом, наблюдается, насколько благоприятно распределяется поток металла с точки зрения силового воздействия на стенку формы.

Результаты гидродинамического расчёта можно пронаблюдать в динамике: в автоматическом режиме просмотреть «фильм» о заполнении полости формы, просматривать пошагово, производить любые сечения и т.д. На рис. 2.3 – 2.5 приведены лишь отдельные «кадры». На рис. 2.3 – 2.5 различные части отливки и формы окрашены в разные цвета, согласно принятой шкале температур (рис. 2.4, 2.5) либо скоростей (рис. 2.3) 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, под панелью, отображающей текущее значение времени. Наблюдается поступление металла в соседний шлаковик из другого после растекания металла в нижней части отливки на начальных стадиях заполнения (рис. 2.3, г, д).

Сложное, неравномерное поле температур, имеющее место в отливке и форме (рис. 2.5) на момент окончания заливки, загружали как стартовое поле температур перед началом затвердевания в тепловом модуле «Полигона», что повышает адекватность моделирования.

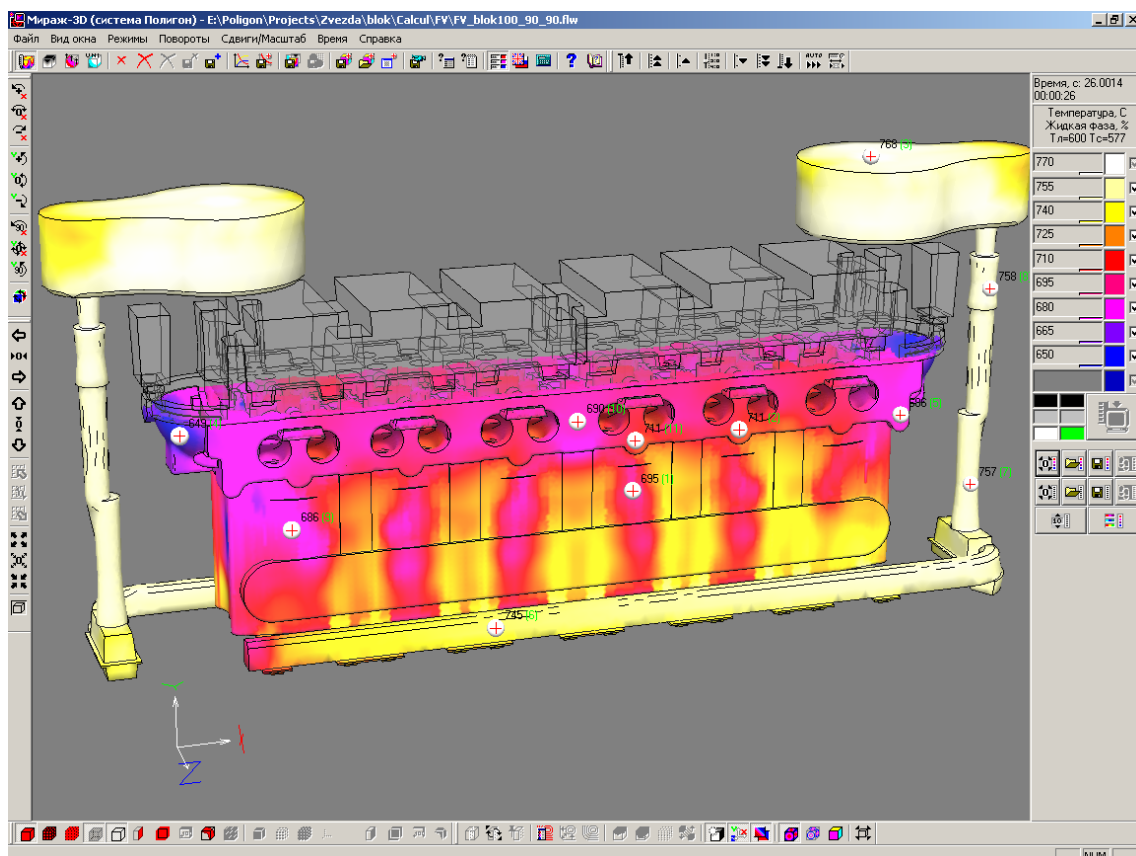


Рис. 2.4. Визуализация результатов гидродинамического расчёта на промежуточной стадии заполнения (температуры)

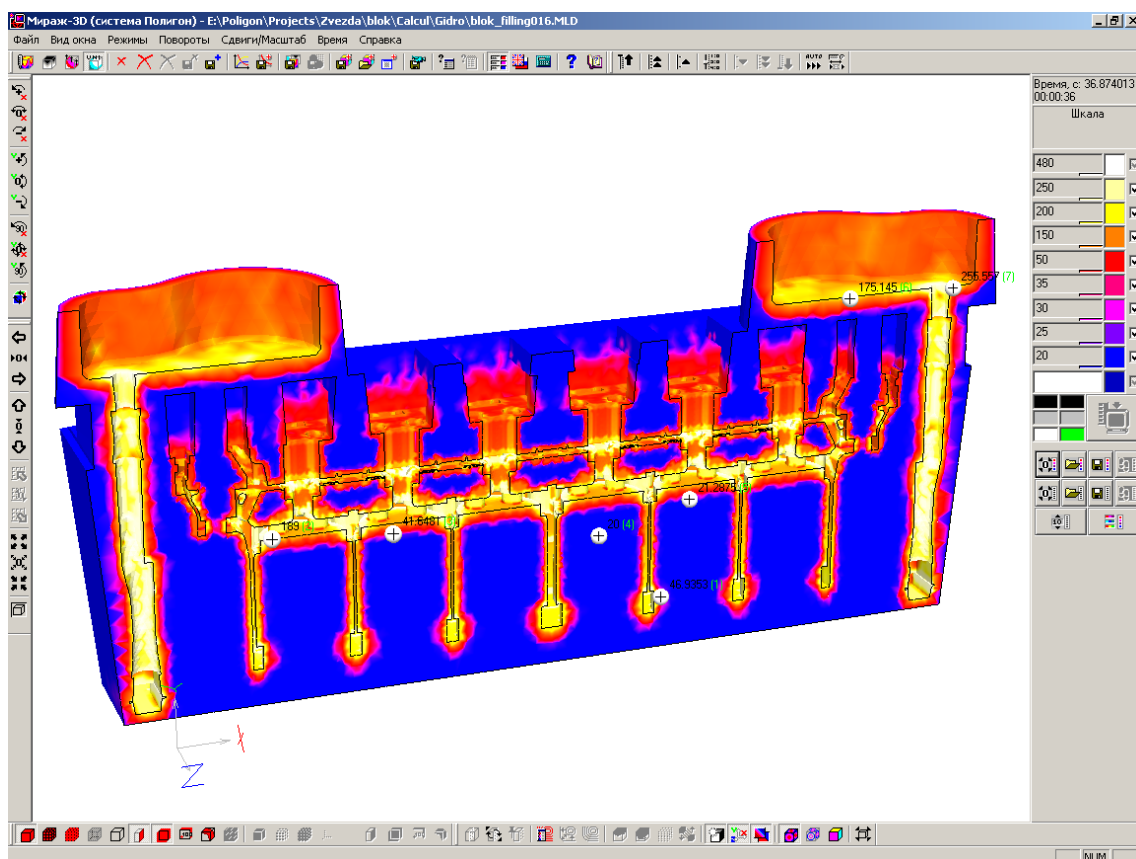
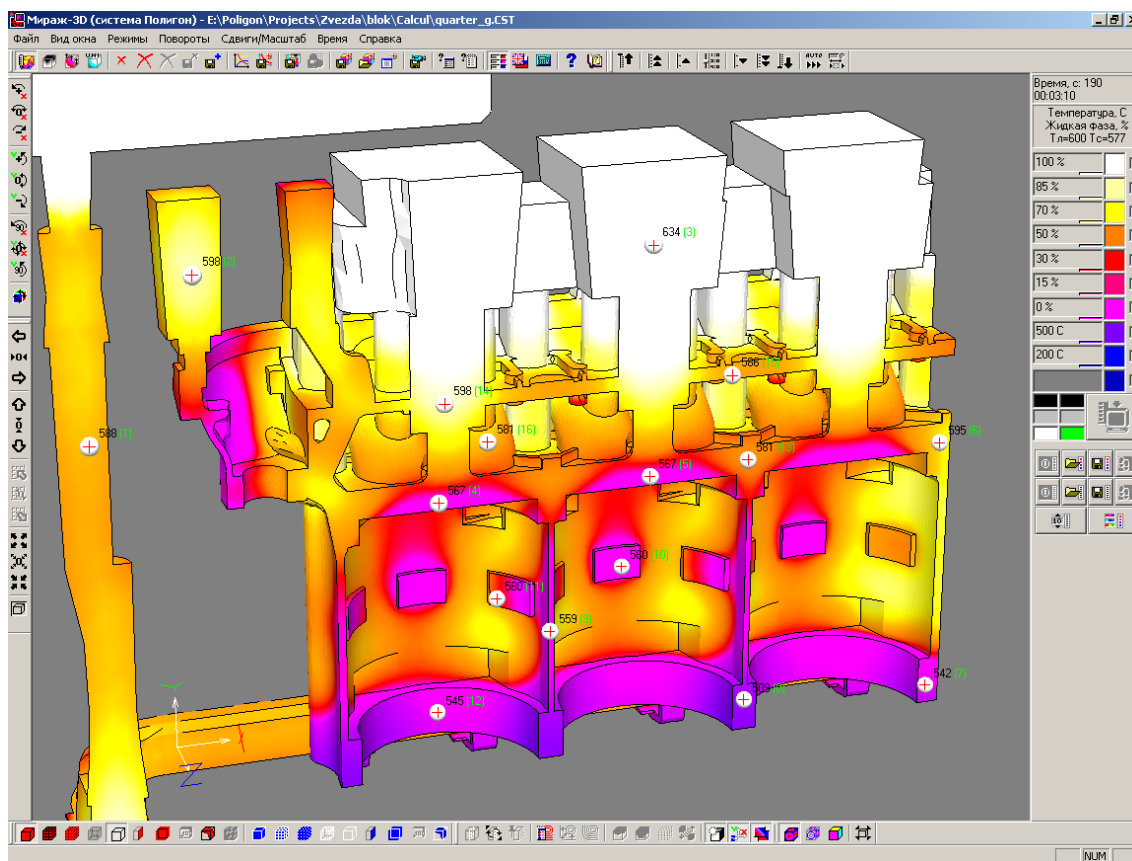


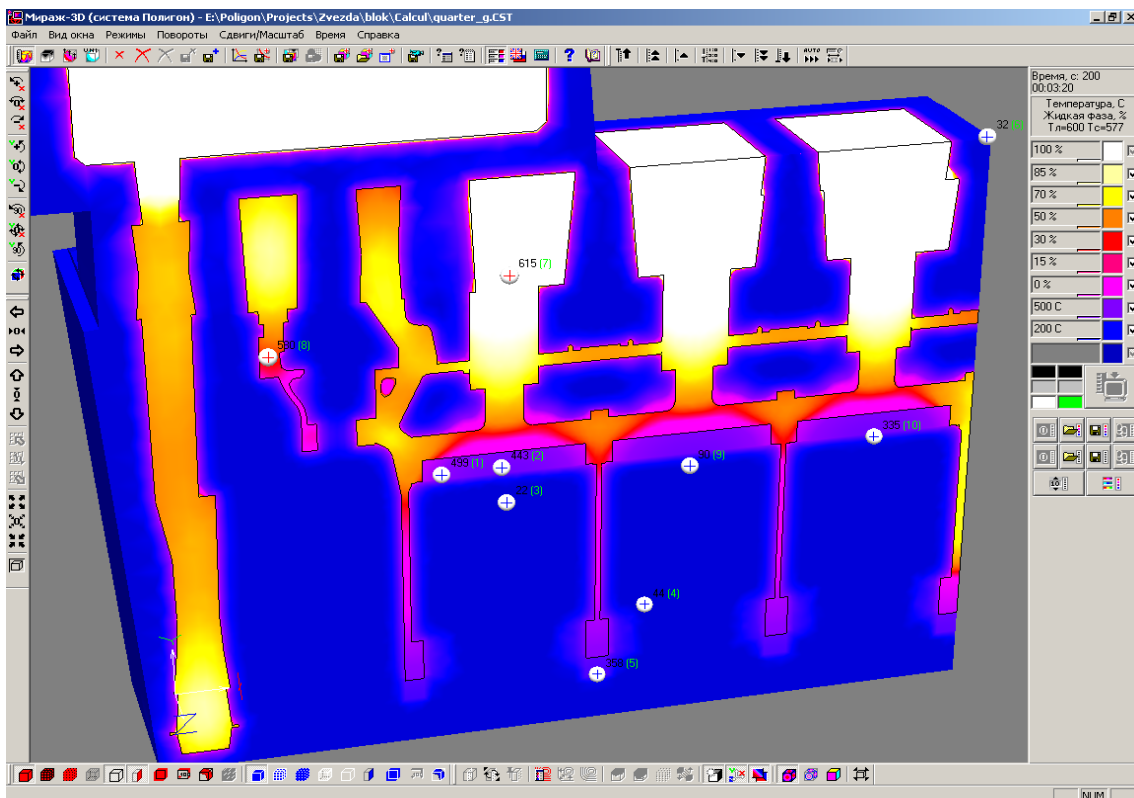
Рис. 2.5. Прогрев формы на небольшую глубину по завершении заполнения расплавом

Следующим этапом стала серия расчётов затвердевания, сопряжённых с расчётом усадочных дефектов. «Полигон» рассчитывает изменение во времени температур в отливке и во всех частях формы, обладающих разными теплофизическими свойствами. Учитывается выделение скрытой теплоты затвердевания, сложный характер переноса тепла на границе отливка-форма и проч. Одним из вариантов визуализации результатов расчёта является просмотр изменения температурного поля на модели отливки (рис. 2.6, а, б). Программа предоставляет возможность 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 более мощный способ визуализации результатов, нежели вывод сечений – вывод зон, в которых поля расчётных величин находятся выше (ниже) определённого задаваемого значения изоповерхности.

При исследовании процессов формирования отливок в «Полигоне» есть возможность записать термические кривые для любой точки в отливке и форме, а затем просматривать и обрабатывать эти графические зависимости в постпроцессоре программного пакета. На рис. 2.6 представлены кривые, позволяющие оценить силу влияния чугунного холодильника, установленного у дна камеры сжатия, на время и интенсивность охлаждения металла на различном удалении от холодильника.



а



б



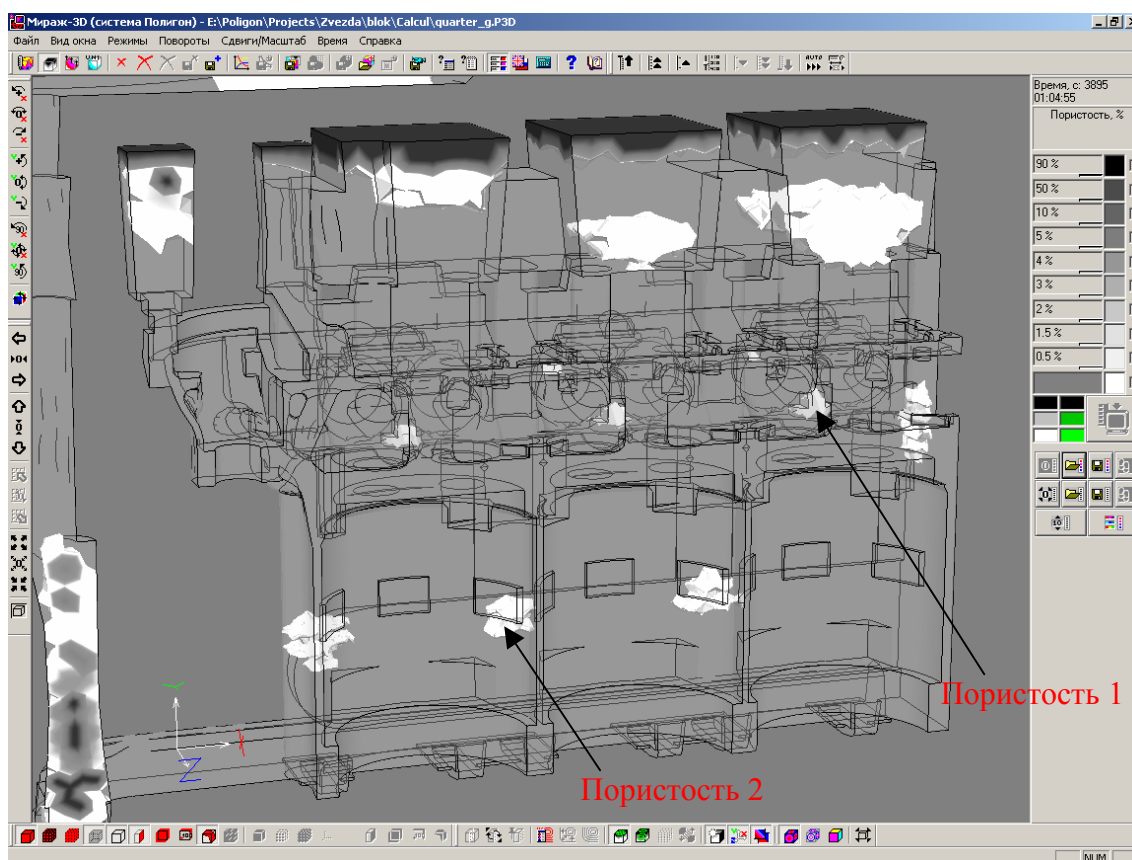
в

Рис. 2.6. Поля температур в процессе затвердевания в характерном сечении отливки
а – одна из промежуточных стадий затвердевания (видно зарождение тепловых узлов в отливке, показаны температуры в нескольких точках);
б – завершающая стадия затвердевания (включена оцифровка сечения отливки, показаны температуры в нескольких точках по сечению формы);
в – термические кривые, снятые в различных точках в области дна камеры сжатия

Результаты расчёта усадочных дефектов приведены на рис. 2.7. «Полигон» производит численный расчёт зон образования макро- и микропористости. Макропористость образуется в условиях недостатка питания в зонах выше зеркала расплава. Микропористость формируется при потенциально удачных условиях по питанию, но при недостатке давления металла, фильтрация которого через зону затвердевания осложнена. Учитывая особенности протекания указанных процессов, «Полигон» рассчитывает продвижение во времени всех зеркал жидкого металла в изолированных зонах, рассчитывает поле давлений в металле на каждом шаге счёта, численно решая дифференциальное уравнение фильтрационного течения. По завершении усадочного расчёта программа позволяет наблюдать динамику формирования дефекта и процент пористости в том или ином месте отливки.

В теле отливки раковин и значительных рыхлотов не обнаруживается. Присутствует макропористость не более 2% (около 3-го балла пористости) в массивных местах (рис. 2.7, б) выше дна камеры сжатия – условно обозначим за дефект №1 – и в «стойках» (рис. 2.7, в) – дефект №2.

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 возникновения усадки выше некоторого уровня (рис. 2.7, а), а также зон изоляции объёмов жидкого металла: на экране не отображаются уже затвердевшие части отливки, наблюдаем лишь те, в которых есть жидкая фаза (рис. 2.8). Таким образом, были выявлены причины возникновения усадки – условия формирования тепловых узлов.



а

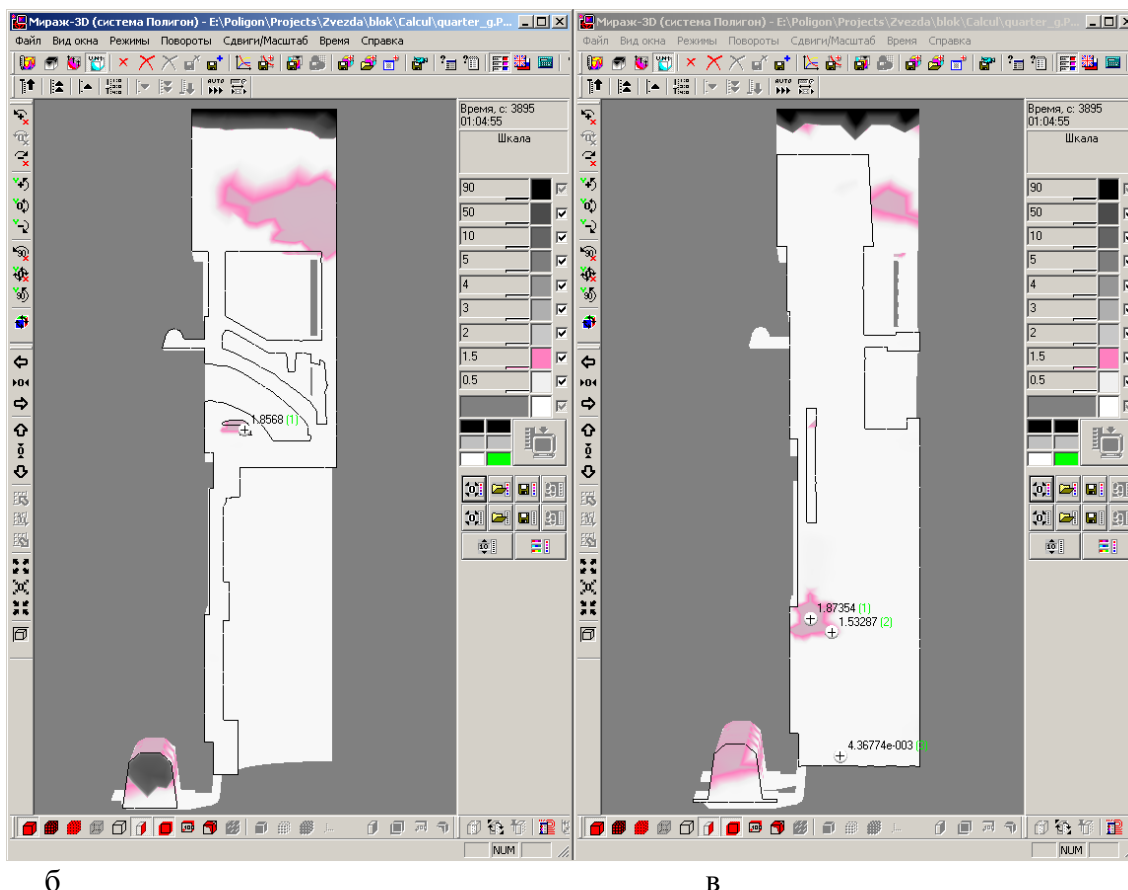
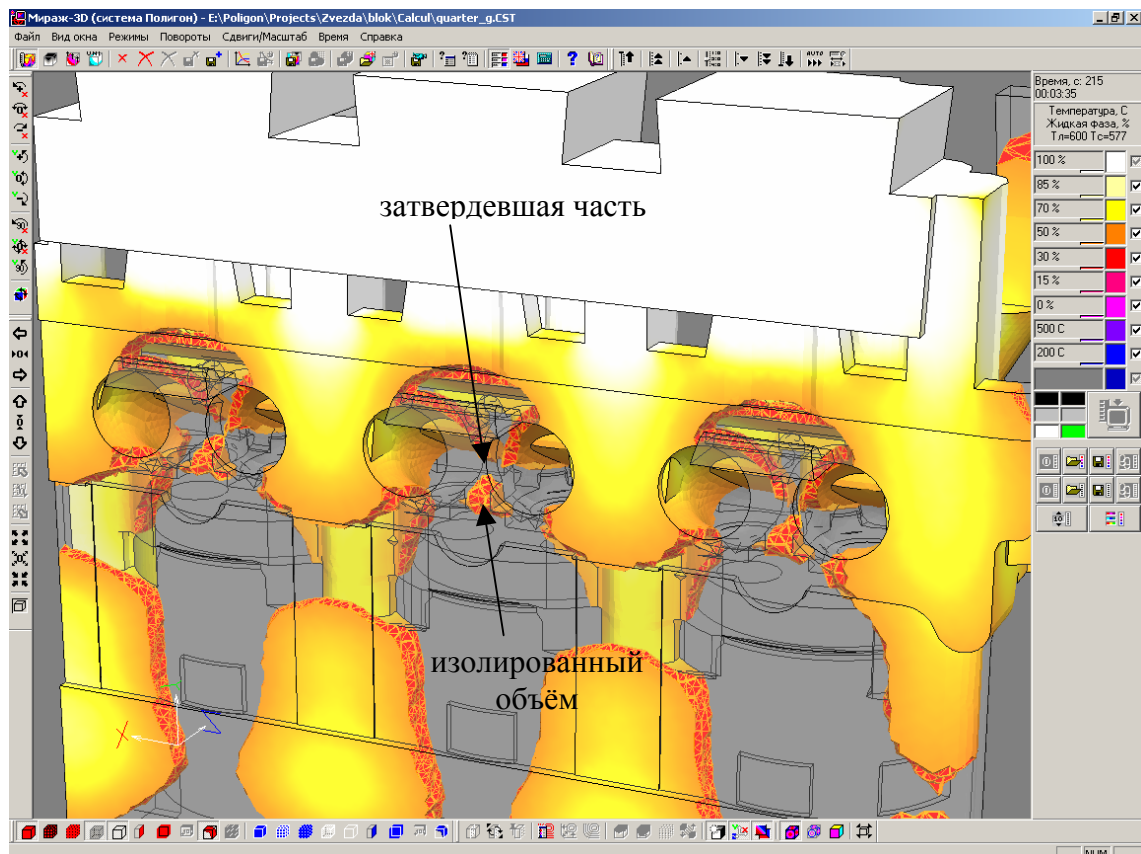
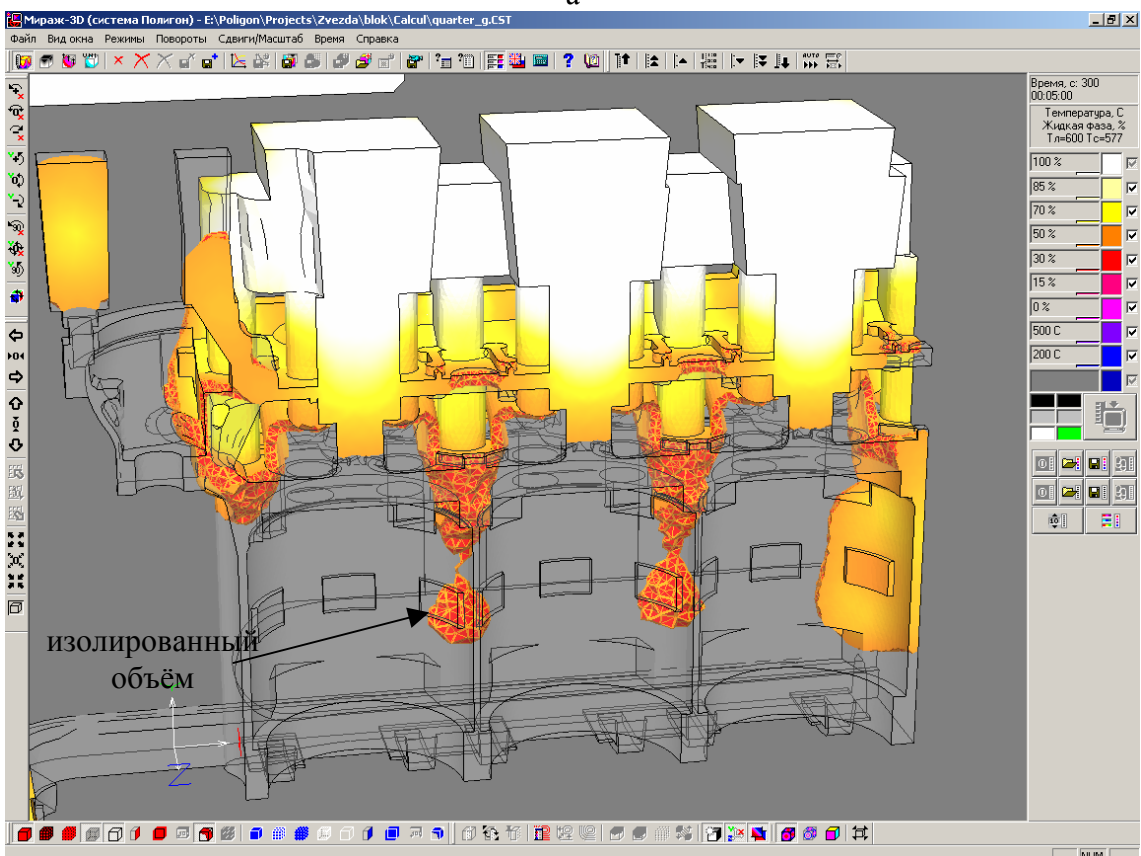


Рис. 2.7. Усадочные дефекты в теле отливки
а – зоны, в которых пористость выше 1%;
б, в – пористость в сечениях, произведённых в местах возникновения пористости 1 и 2 соответственно

Прогноз механических свойств в отливке осуществлялся средствами встроенного в «Полигон» модуля критериального анализа, предназначенного для обработки расчётных полей, полученных при моделировании литейной технологии. В данном случае обработке подлежало поле температур во времени при затвердевании отливки. Первоначально это поле было обработано на предмет установления скорости охлаждения (одна из стандартных критериальных функций, наряду с локальной продолжительностью затвердевания, градиентами температур и поля жидкой фазы и др.) в различных частях тела отливки. Исходя из рассчитанных значений скорости для мест вырезки образцов и статистическим данным по механическим свойствам (схема вырезки образцов и данные предоставлены Заказчиком) в образцах были построены полиномиальные зависимости, связывающие прочность и пластичность со скоростью охлаждения. Результаты измерения механических свойств в различных местах отливки усредняли по предоставленным Заказчиком 12 вариантам заливки, исключая заведомо некорректные данные измерений (слом образца, разрыв за керном). Для прочности строили также полиномы, связывающие минимальный уровень её значений со скоростями охлаждения для оценки ситуации, возникающей в наихудшем варианте (рис. 2.9, г). Результат предсказания уровня механических свойств во всём теле отливки приведён на рис. 2.9 и 2.10. Для детального ознакомления файлы результатов переданы Заказчику.

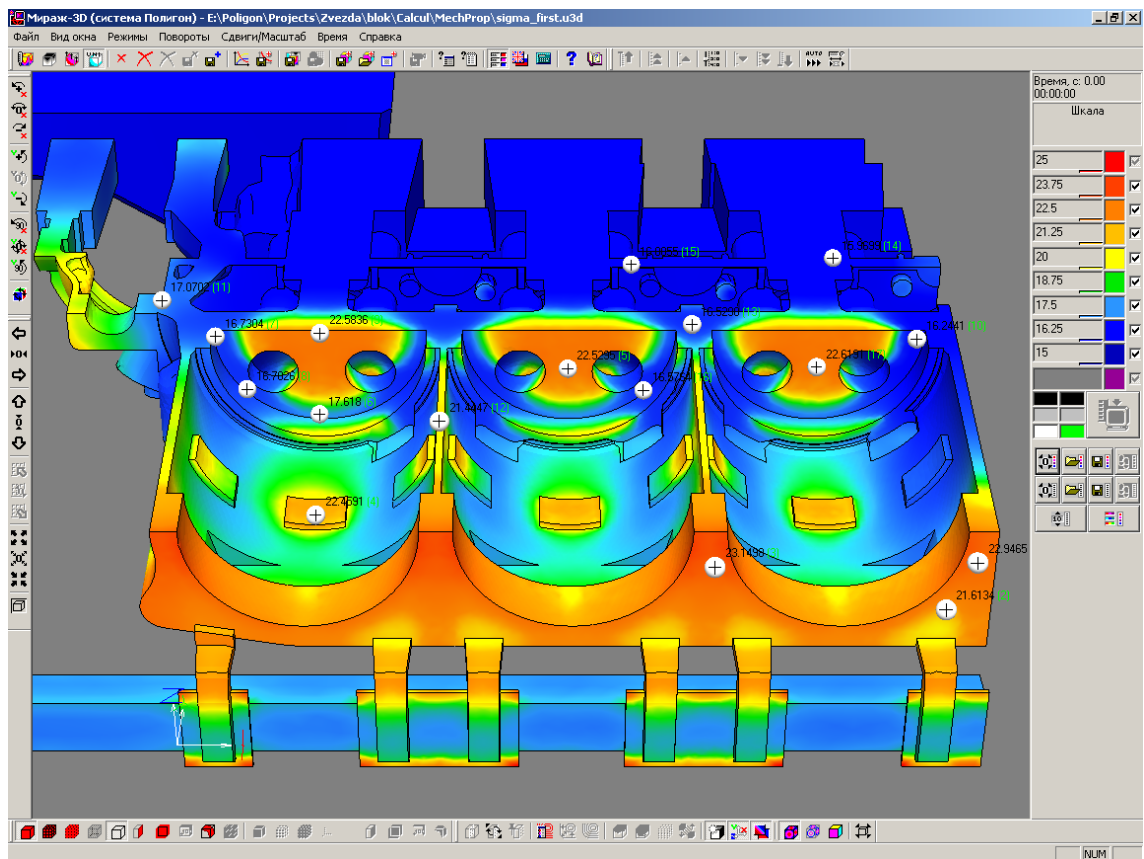


а

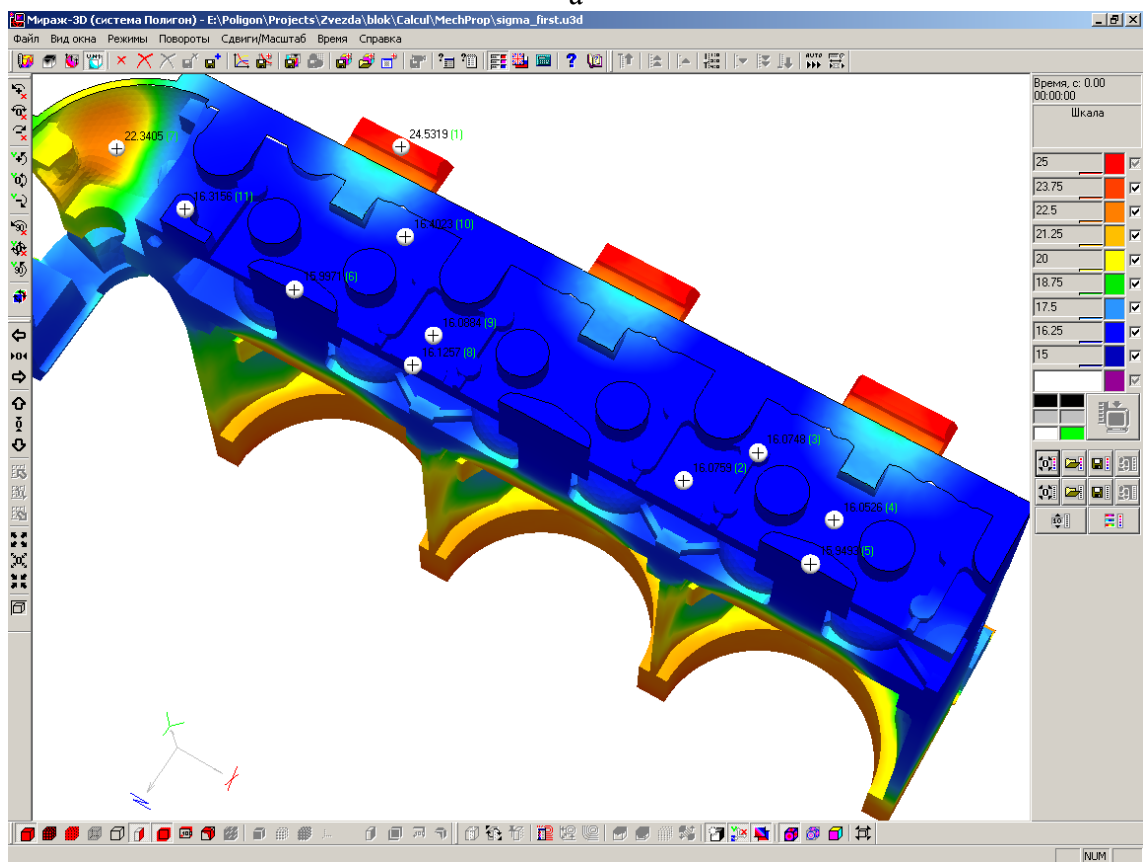


б

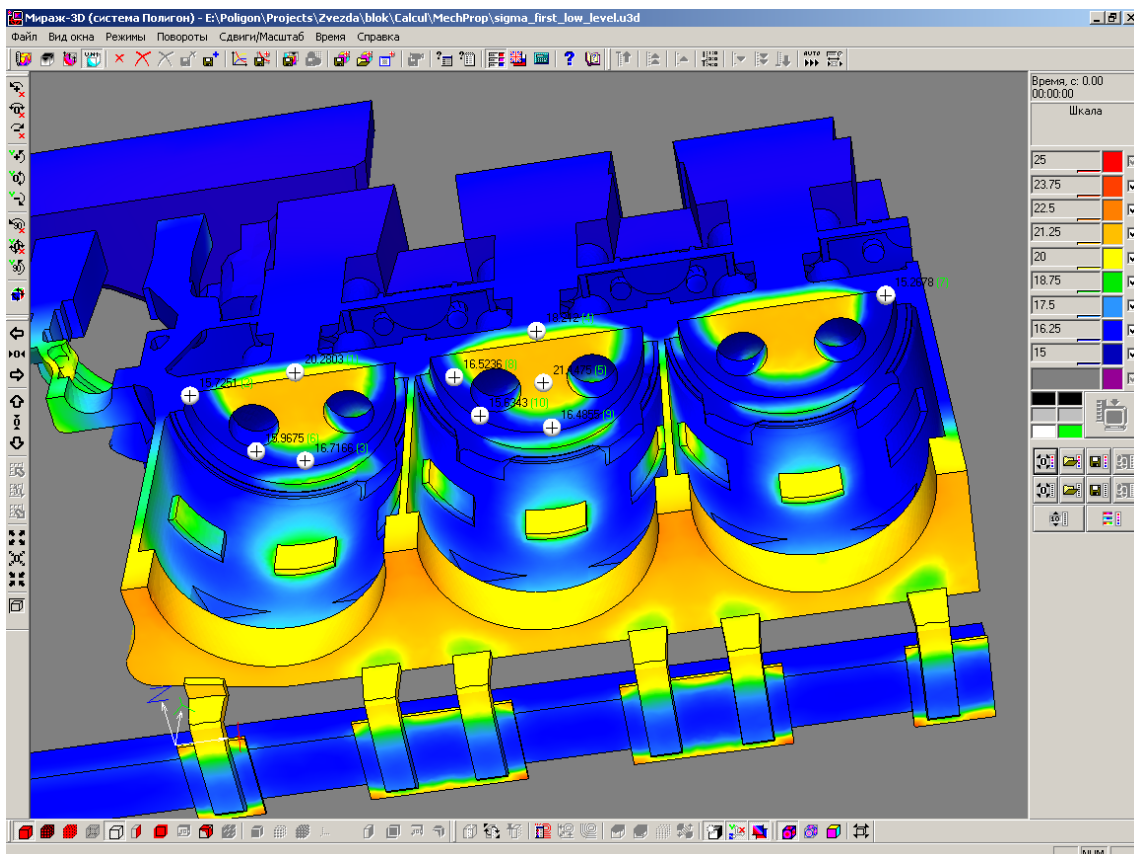
Рис. 2.8. Тепловые причины возникновения дефектов, прослеженные при помощи вывода зон выше значения изоповерхности в 50% жидкой фазы (выявление тепловых узлов)
а – причины возникновения зон рыхлоты 1; б – причины возникновения зон рыхлоты 2



a



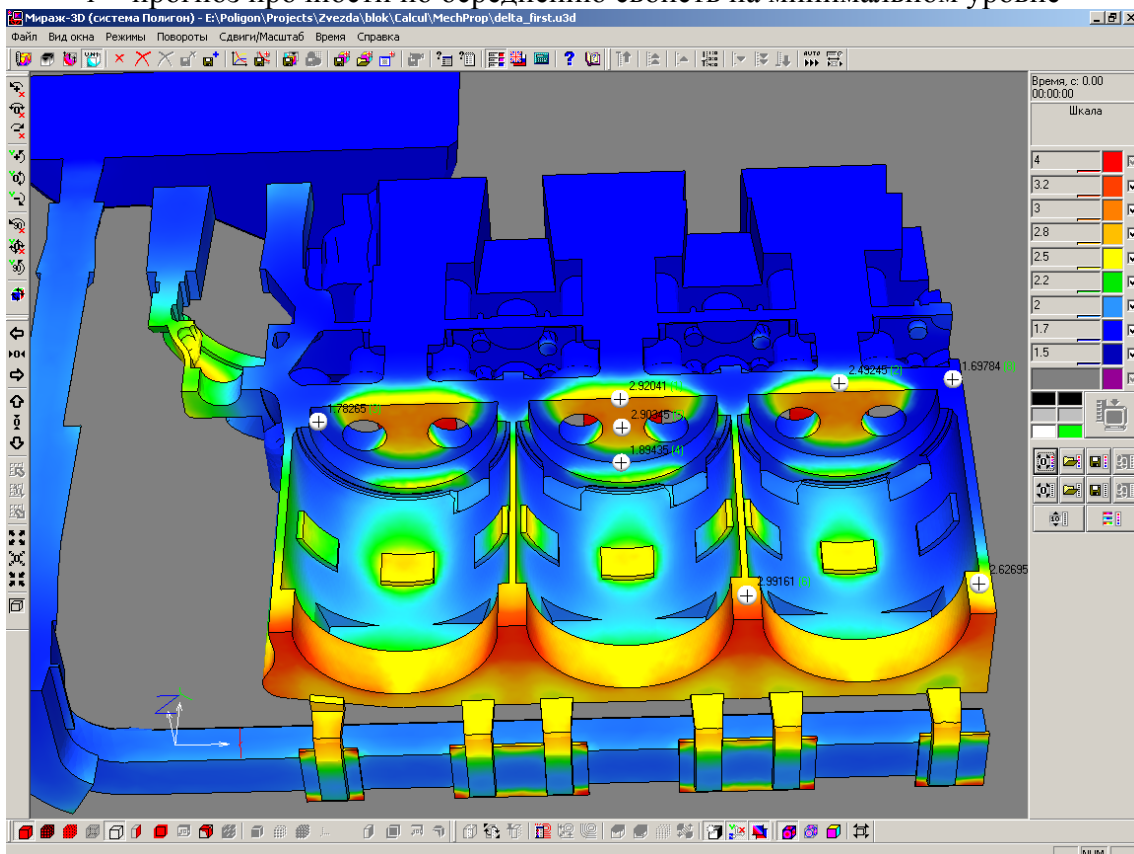
б



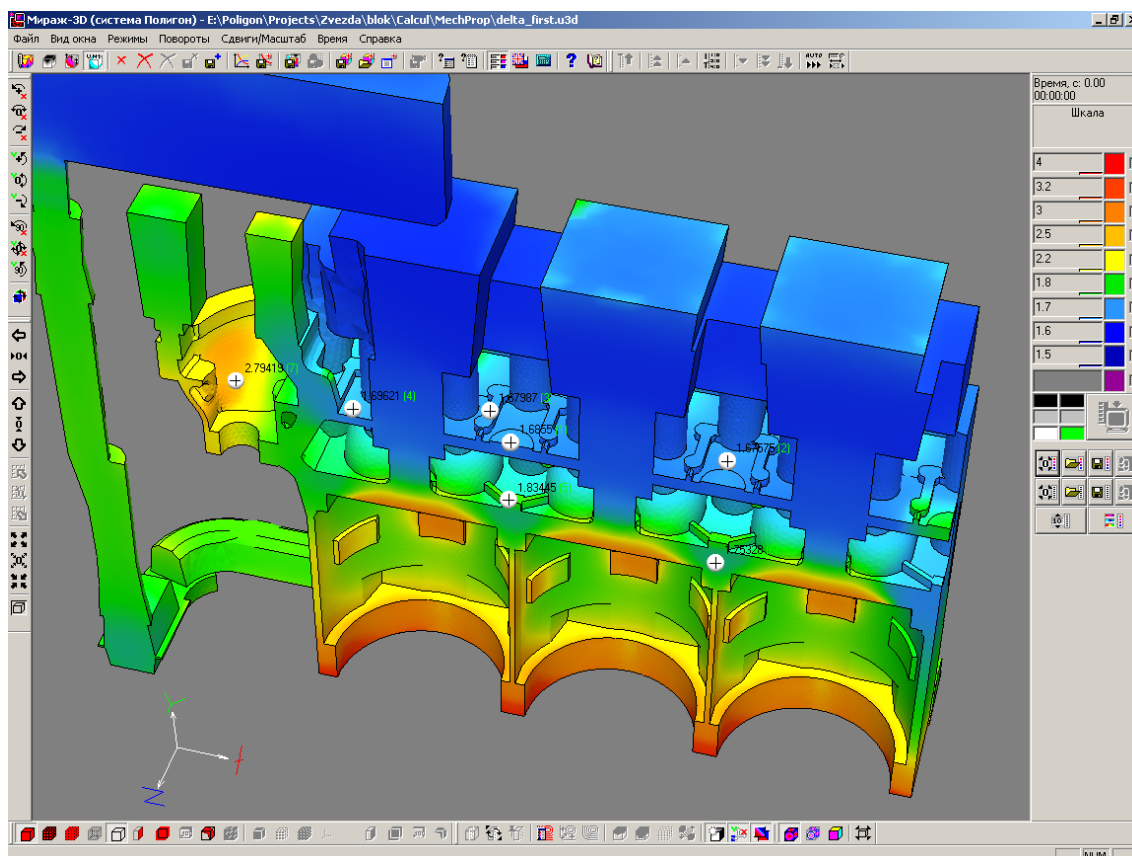
г

Рис. 2.9. Распределение прочности (кгс/мм^2) в теле отливки
а – отливка повернута таким образом, чтобы было видно дно камеры сжатия;
б – отсечена верхняя (прибыльная) часть;

г – прогноз прочности по усреднению свойств на минимальном уровне



а



б

Рис. 2.10. Распределение относительного удлинения (%) в теле отливки
а, б – различные ракурсы

3. Оценка эффективности мероприятий, направленных на исключение дефектов из тела отливки и обеспечения необходимого уровня механических свойств в зонах вырезки образцов для испытаний

В результате обсуждения с представителями Заказчика промежуточных результатов моделирования наличие пористости 1 (рис. 2.7, б) признано наиболее опасным, поскольку при механической обработке в указанных местах происходит растрескивание металла. Для предотвращения возникновения пористости предложена установка дополнительных чугунных холодильников, с учётом чего созданы специальные КЭ-модели (рис. 3.1). На рис. 3.2 продемонстрирован один из этапов работы холодильников, которые эффективно предотвращают возникновение теплового узла и усадку в проблемной зоне (рис. 3.3).

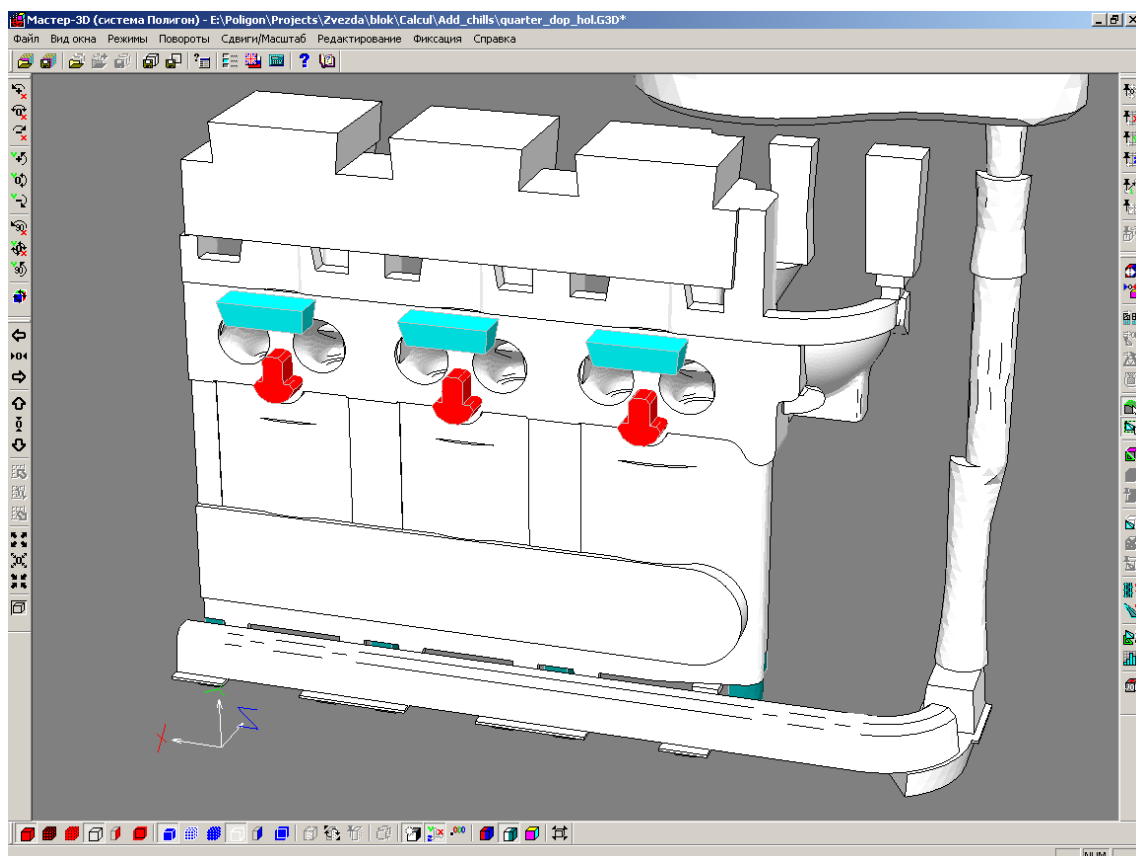
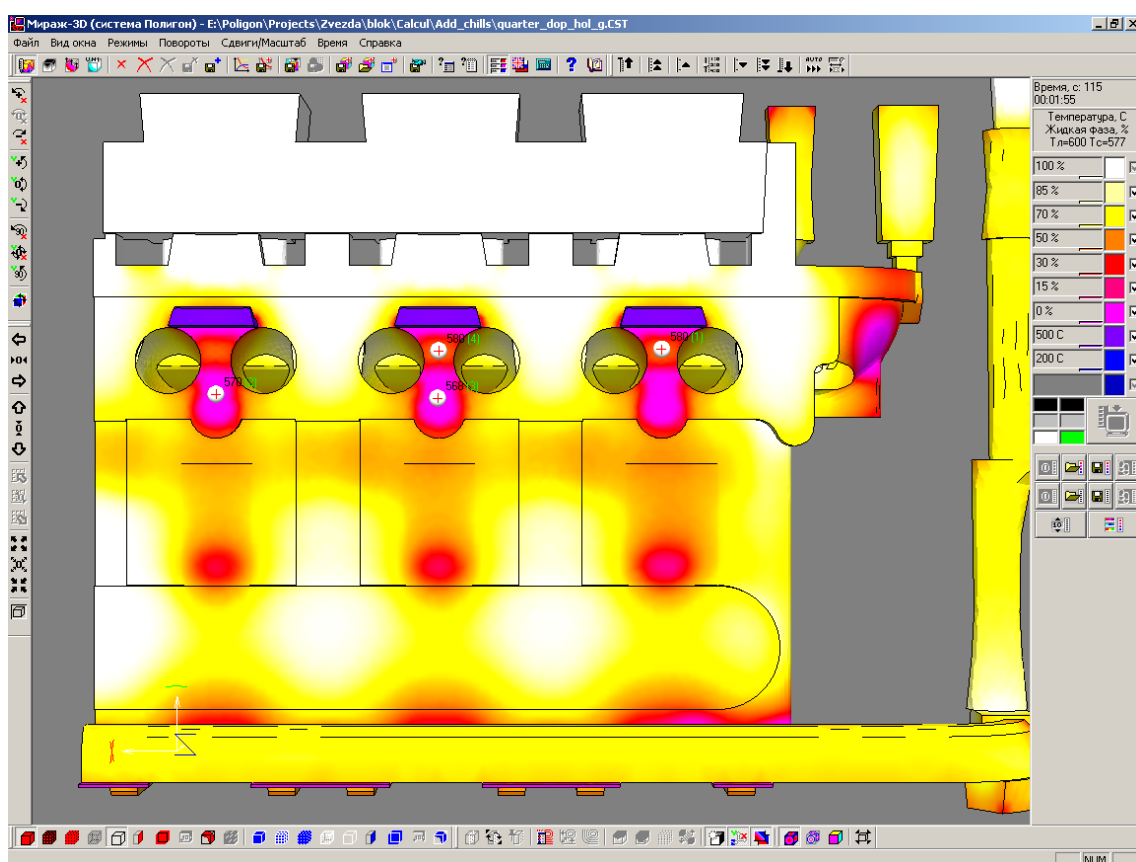
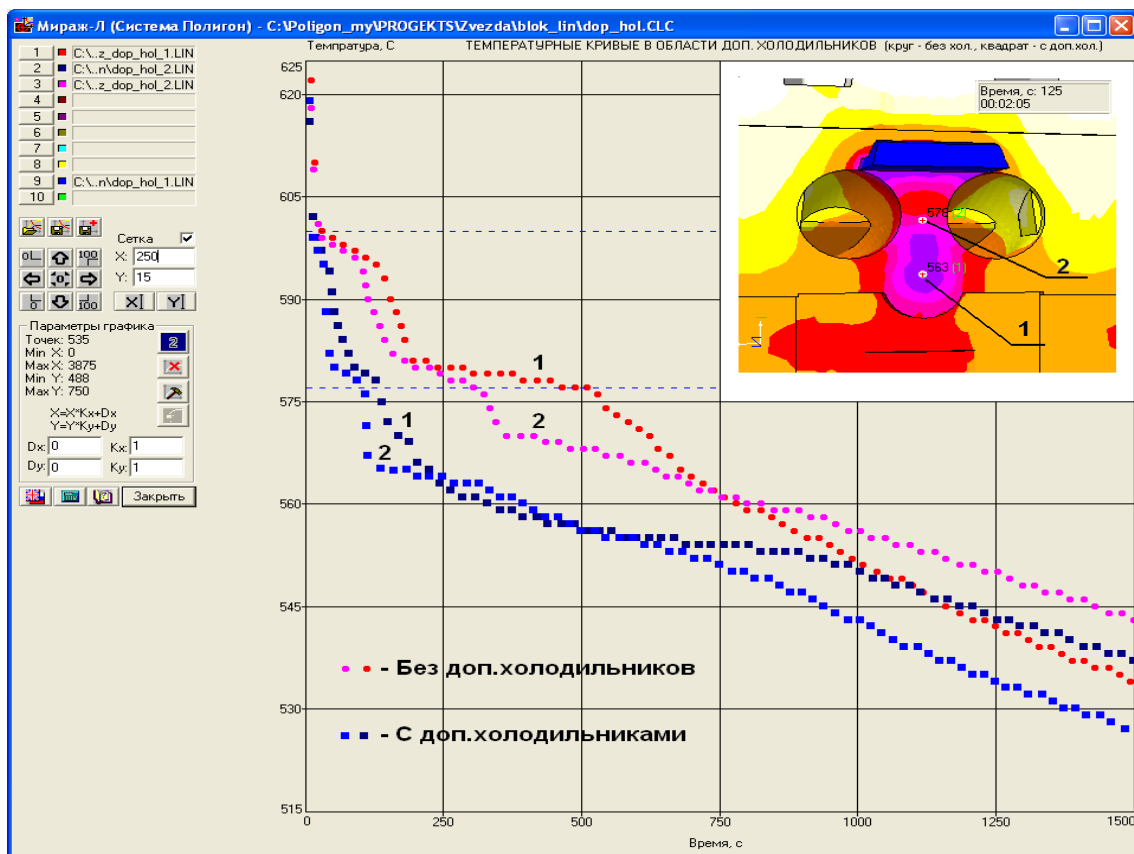


Рис. 3.1. Дополнительные чугунные холодильники в зонах возникновения пористости 1 (основная часть формы скрыта)



a



б

Рис. 3.2. Результаты теплового расчёта, иллюстрирующие работу холодильников по предотвращению появления тепловых узлов расчёта затвердевания отливки с дополнительными холодильниками

а – визуализация в постпроцессоре системы моделирования;

б – термические кривые, отражающие влияние дополнительных холодильников на температурный режим, в сравнении с кривыми, полученными в тех же точках отливки, изготовленной без применения дополнительных (базовая технология)

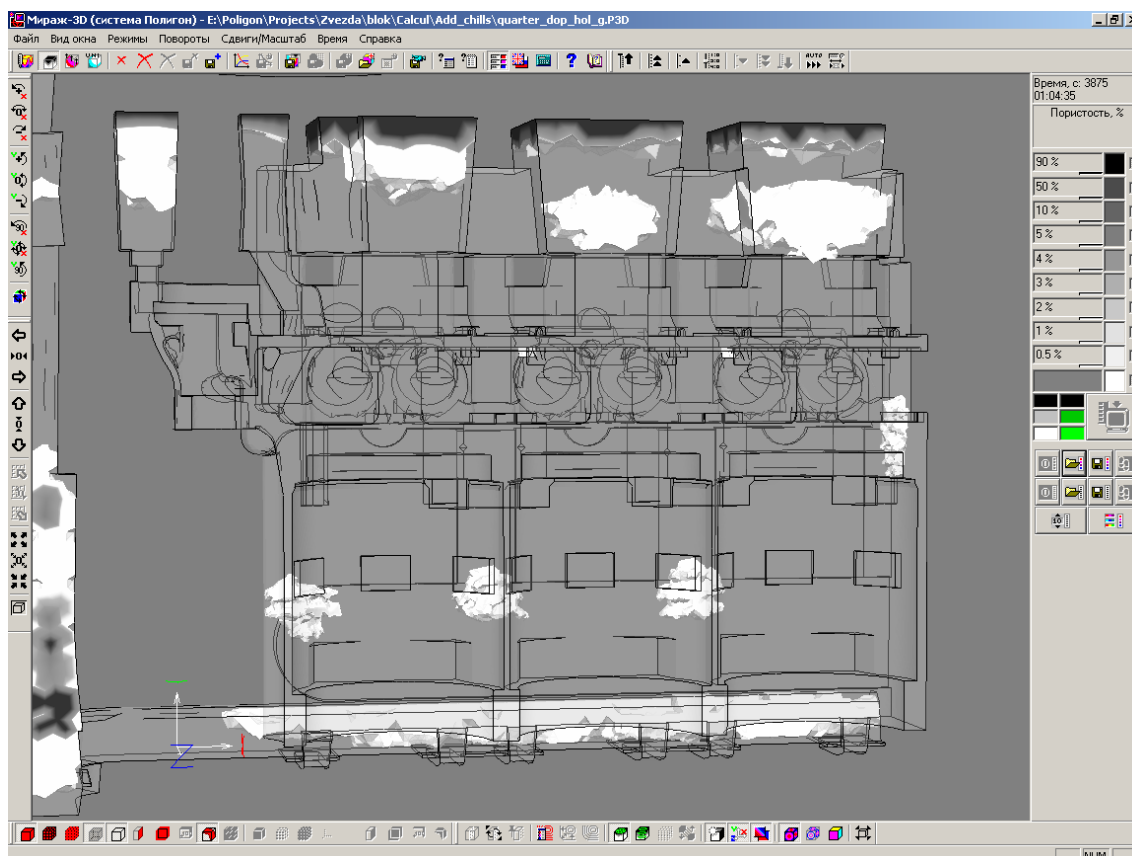
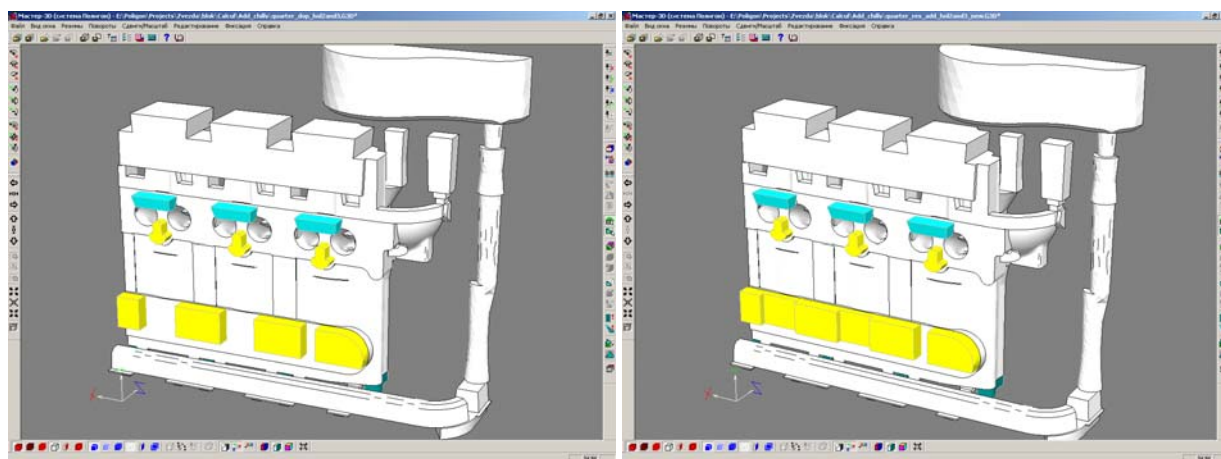


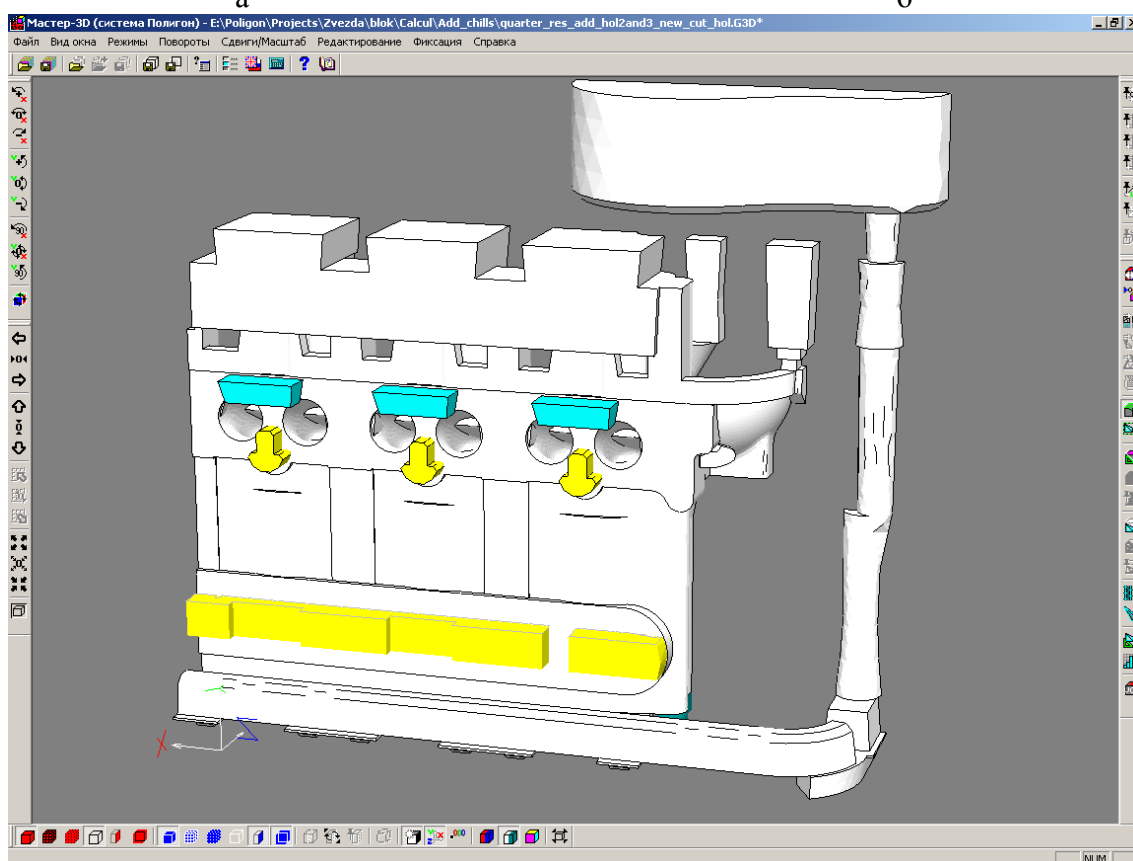
Рис. 3.3. Результат усадочного расчёта, визуализированный путём вывода зон, пористость в которых превышает 1%: пористость в зоне установки дополнительных холодильников отсутствует

Необходимо также было исследовать пути исключения пористости, остающейся в стойках (рис. 3.3). Для этого была предложена установка холодильников в районе тепловых узлов, возникающих в стойках (рис. 3.4, а). Расчёты показали, что предложенный вариант 1 не является удовлетворительным, поскольку, несмотря на сокращение размера дефектных зон (они также смещаются), происходит образование теплового узла (рис. 3.6, а), а, следовательно, и пористости (рис. 3.5, а) в зоне между холодильниками. На основе наблюдений за процессом затвердевания конфигурация холодильников была изменена так, как показано на рис. 3.4, б: несколько холодильников были объединены в один. Расчёт по варианту 2 показал, что зона пористости в стойках заметно сократилась (рис. 3.5, б) и никаких дополнительных тепловых узлов не возникает. Наблюдение за ходом затвердевания (рис. 3.6, б) позволило выработать оптимальную конструкцию холодильников (рис. 3.4, в), действие которых локализовано исключительно в зоне тепловых узлов, обеспечивает их эффективное захолаживание (рис. 3.6, в) и отсутствие дефектов в отливке (рис. 3.5, в): в варианте 3 высота холодильников несколько сокращена по сравнению с вариантом 2. Чертежи холодильников по варианту 3 с основными размерами переданы Заказчику.



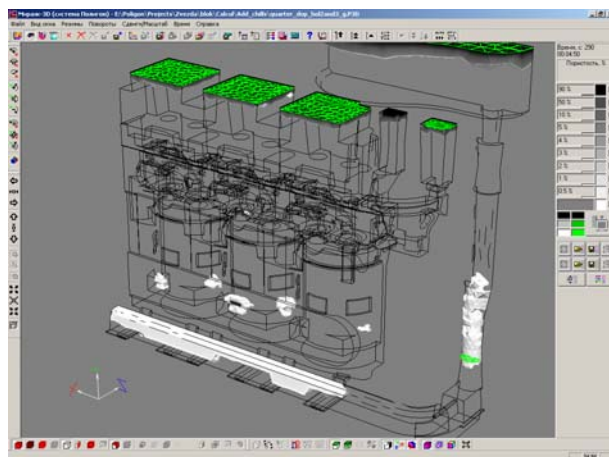
а

б

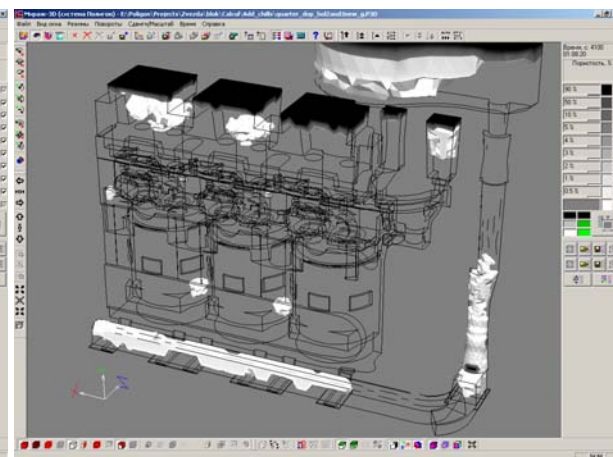


в

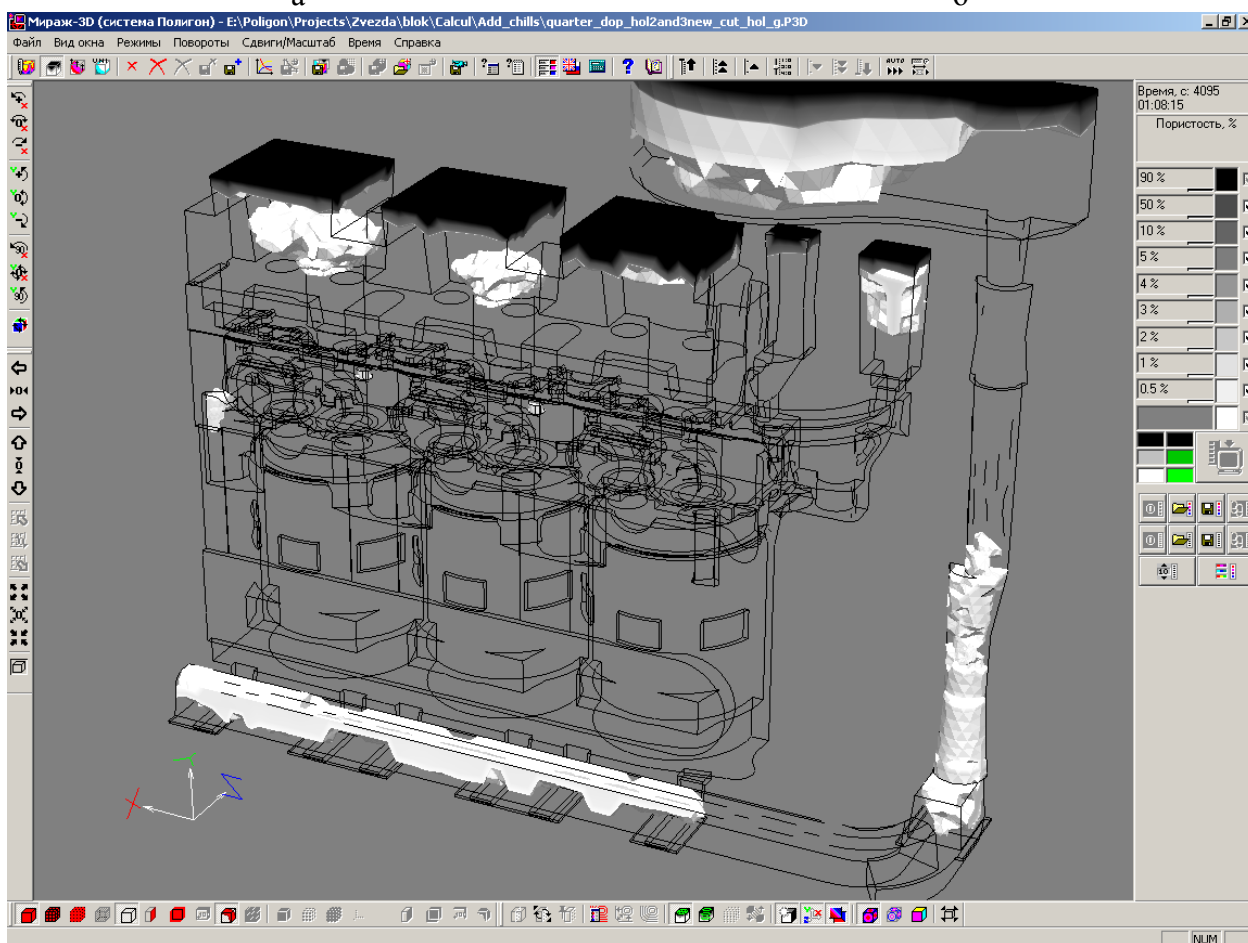
Рис. 3.4. Этапы выбора наилучшей конфигурации холодильника
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3 (наилучший)



а



б



в

Рис. 3.5. Результаты расчёта пористости при применении различных вариантов конфигурации холодильника
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

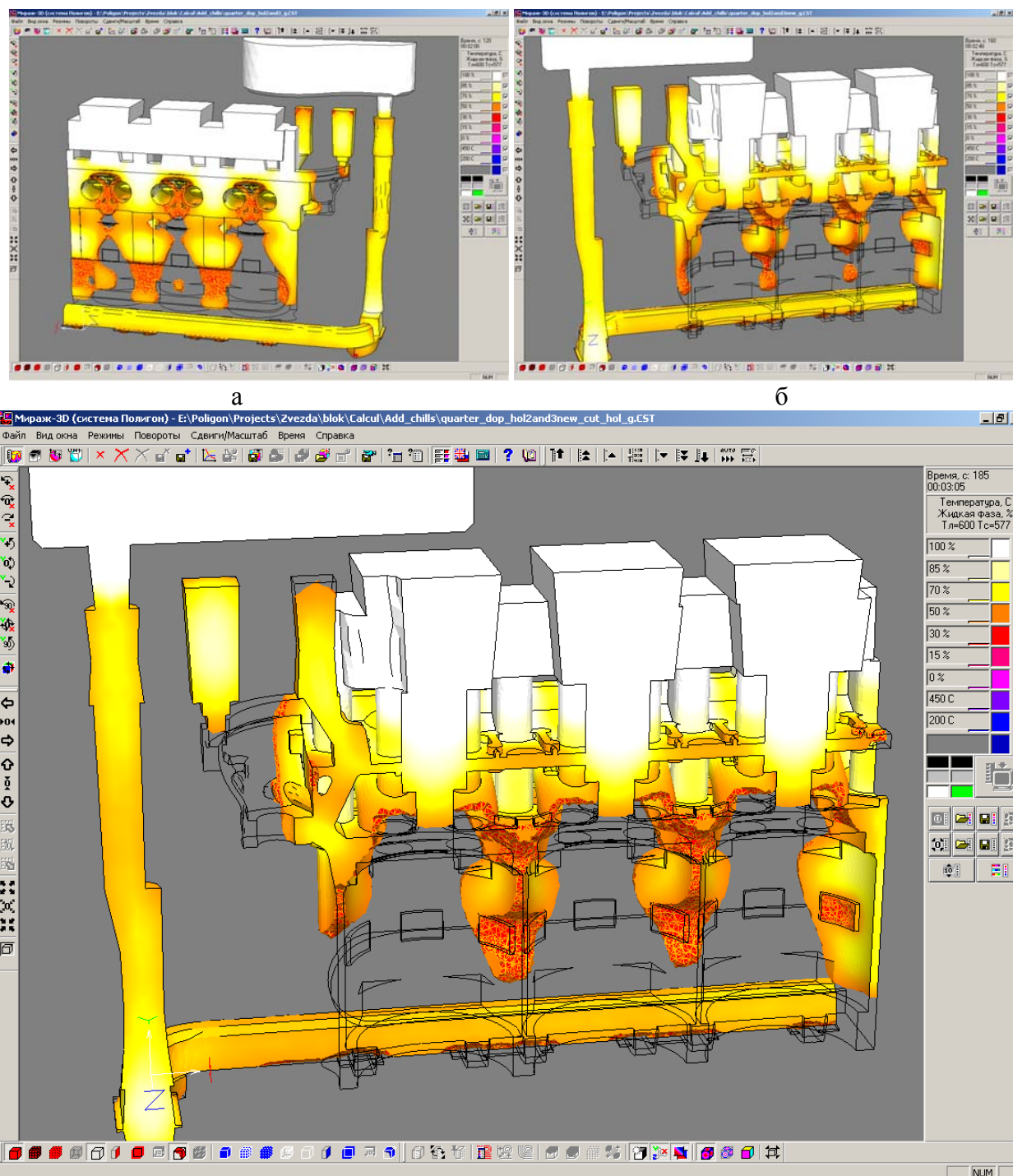


Рис. 3.6. Особенности тепловой работы холодильников различной конфигурации
а – вариант 1; б – вариант 2; в – вариант 3

Для увеличения скорости охлаждения зоны дна камеры сжатия, в которой не удаётся обеспечить требуемый уровень механических свойств, исследована возможность замены чугунных холодильников в этой зоне на медные (рис. 3.7). Результат расчёта показал, что уровень механических свойств в результате таких мероприятий становится даже несколько ниже (рис. 3.8). Анализ результатов теплового расчёта (рис. 3.9) выявил причины неэффективности опробованного варианта: за счёт высокой теплопроводности недостаточно массивный медный холодильник быстро прогревается, за это время захлаживаемая им часть не успевает затвердеть. Далее наличие такого чрезмерно прогретого объёма в форме даёт обратных эффект – холодильник начинает замедлять отвод тепла от отливки.

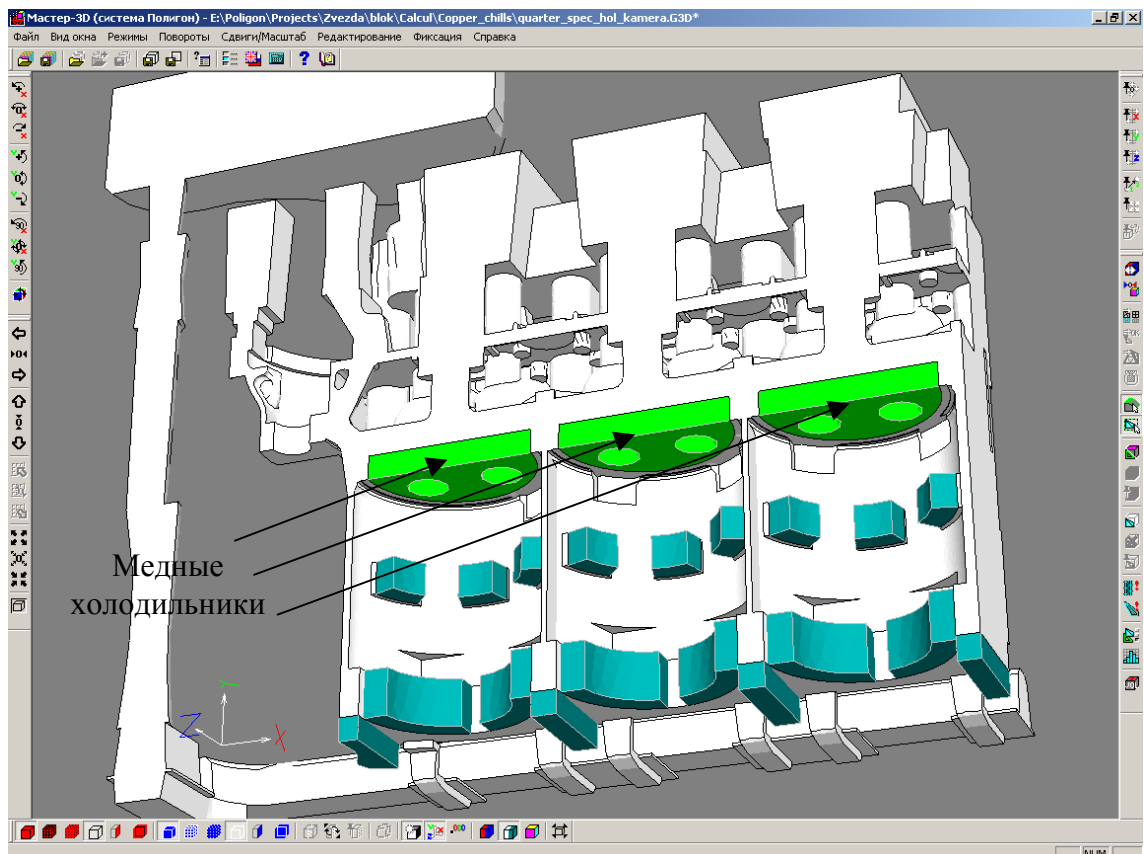


Рис. 3.7. Замена чугунных холодильников в области дна камеры сжатия на медные (основная часть формы скрыта)

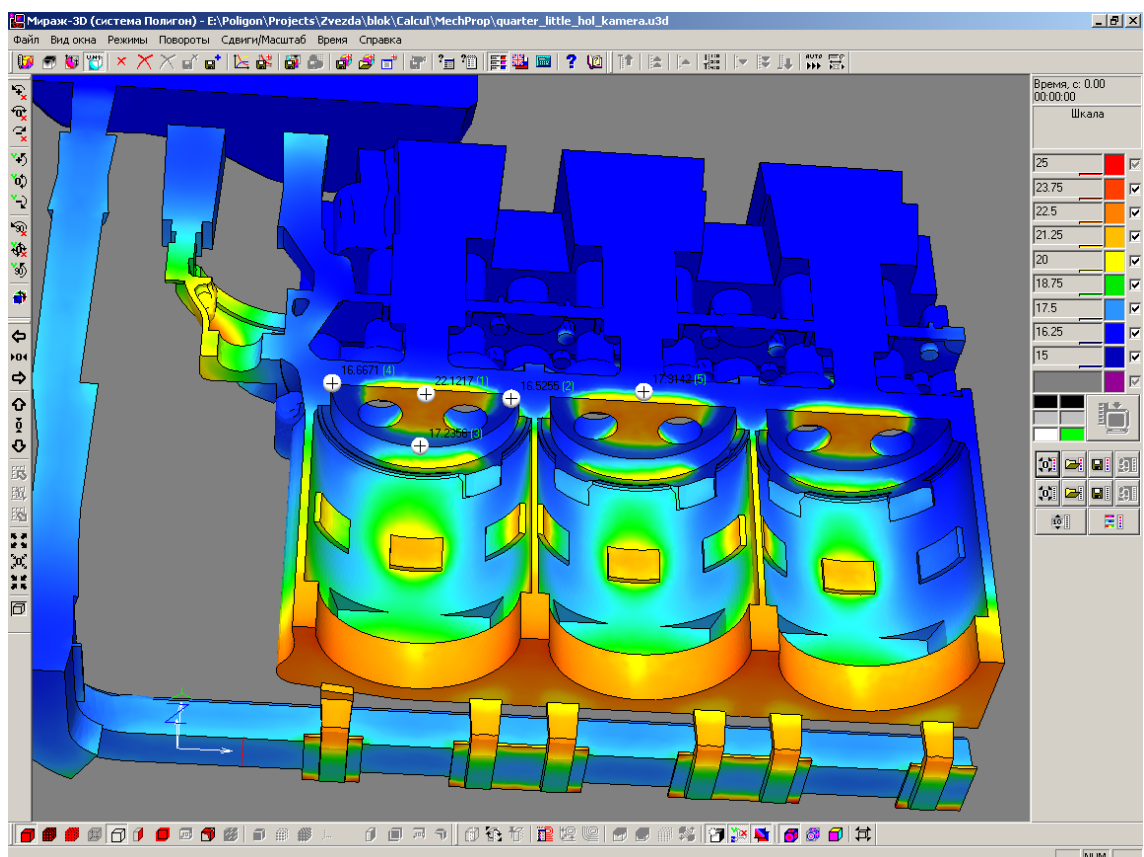


Рис. 3.8. Расчёт прочности (кгс/мм²) в теле отливки, изготовленной с медными холодильниками

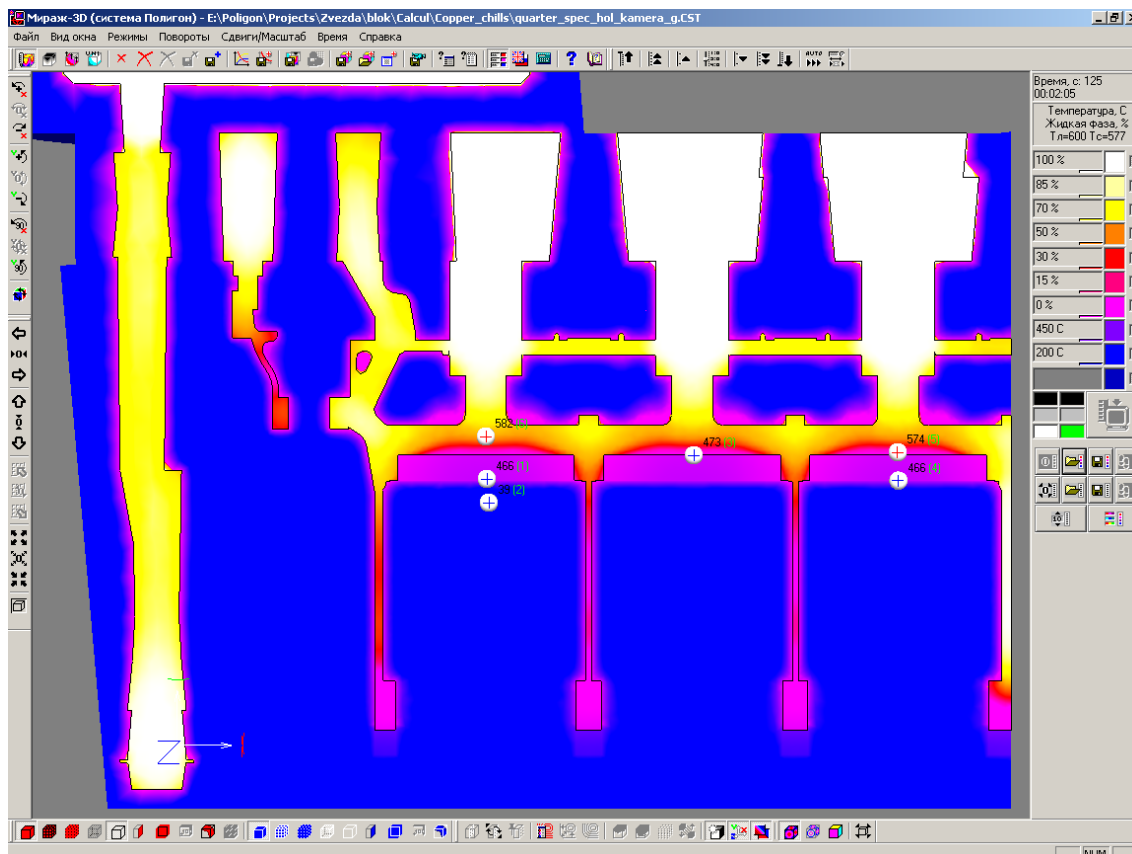


Рис. 3.9. Прогрев медных холодильников на ранней стадии затвердевания

Был исследован вариант увеличения объёма холодильников в проблемной зоне (рис. 3.10). Толщина холодильников в геометрической модели была увеличена в 3 раза, в одном из расчётов холодильники заданы медным, в другом – чугунными. Результаты исследований показали, что и медные, и чугунные увеличенные холодильник надёжно обеспечивают повышение скорости охлаждения в зоне дна камеры сжатия (рис. 3.12 и 3.14), поэтому прогнозируется удовлетворительный уровень механических свойств в зонах вырезки образцов (рис. 3.11 и 3.13). Уровень механических свойств при использовании медных холодильников немного выше, чем при применении чугунных.

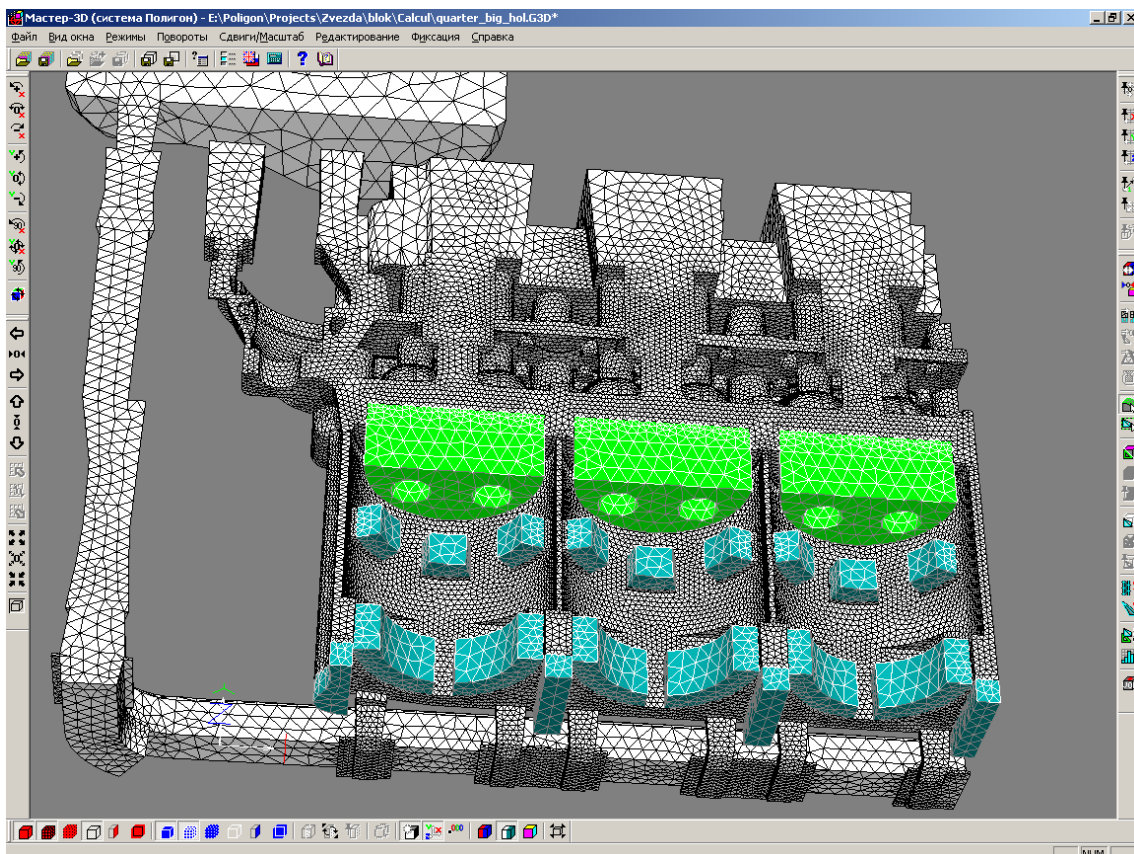


Рис. 3.10. Геометрическая модель с увеличенными холодильниками, установленными в области камеры сжатия

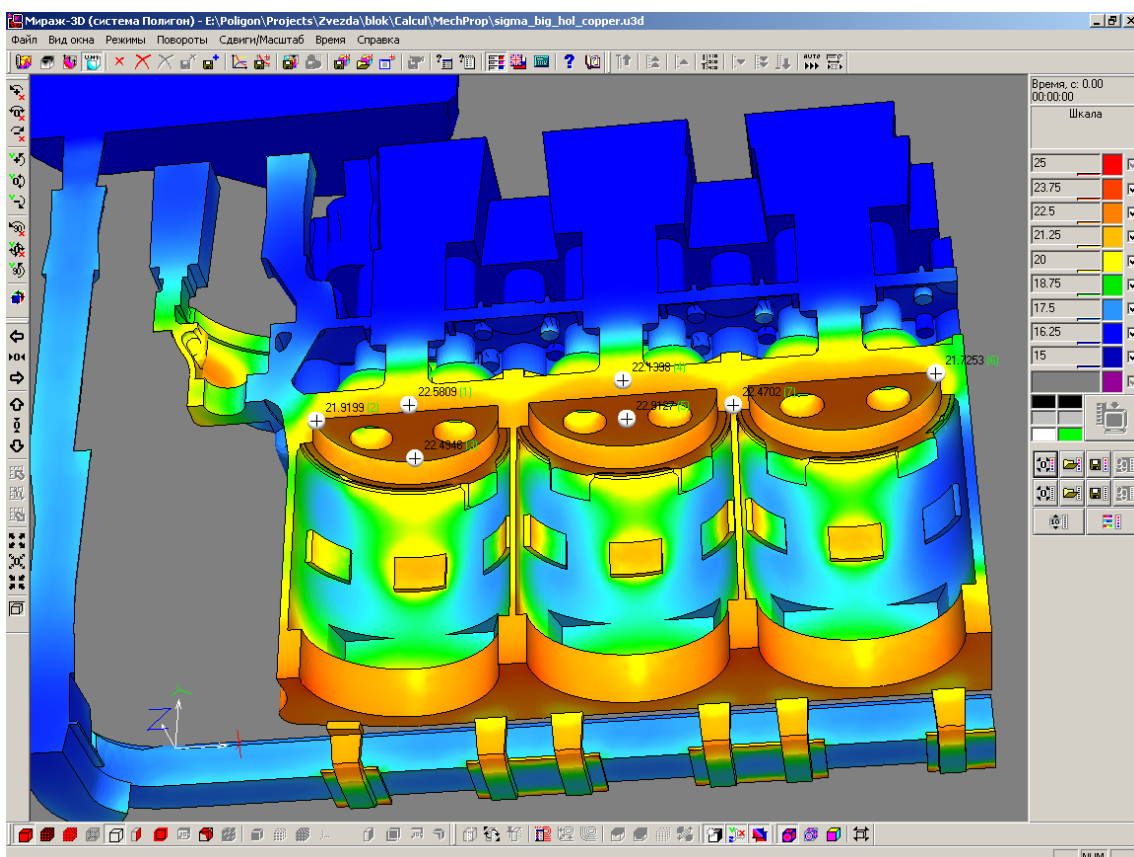


Рис. 3.11. Прочность (кгс/мм^2) в отливке, изготовленной с применением увеличенных медных холодильников в области дна камеры сжатия

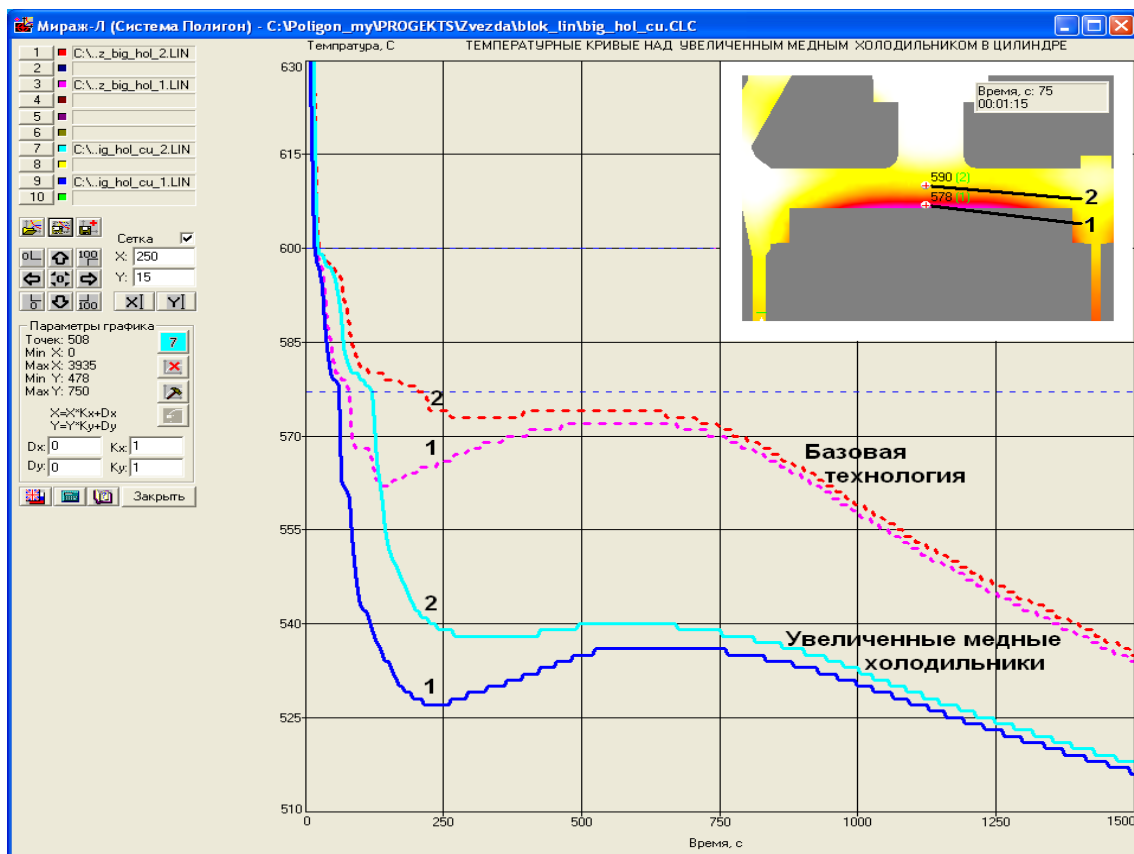
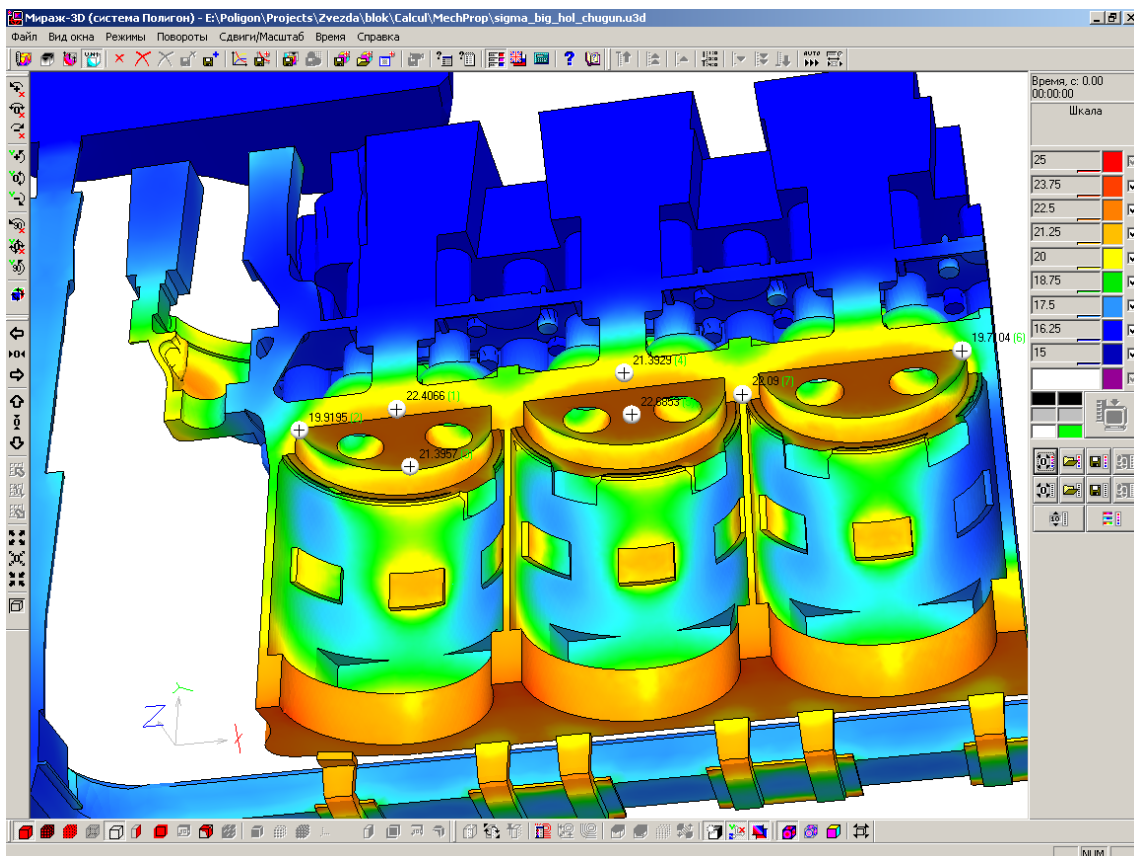


Рис. 3.12. Температурный режим затвердевания в области дна камеры сжатия при увеличенных медных холодильниках: сравнение температурных кривых при увеличенных медных холодильниках с температурными кривыми при изготовлении отливки по базовой технологии



а

В полке не удаётся обеспечить требуемый уровень свойств. Увеличение скорости охлаждения металла в полке осложнено трудностью установки холодильников в этой зоне. Была произведена экспресс-оценка эффективности изготовления отливки в кокиле из СЧ. На рис. 3.15 показана КЭ-модель исследуемого варианта. Результат оценки уровня механических свойств при литье в кокиль приведён на рис. 3.16.

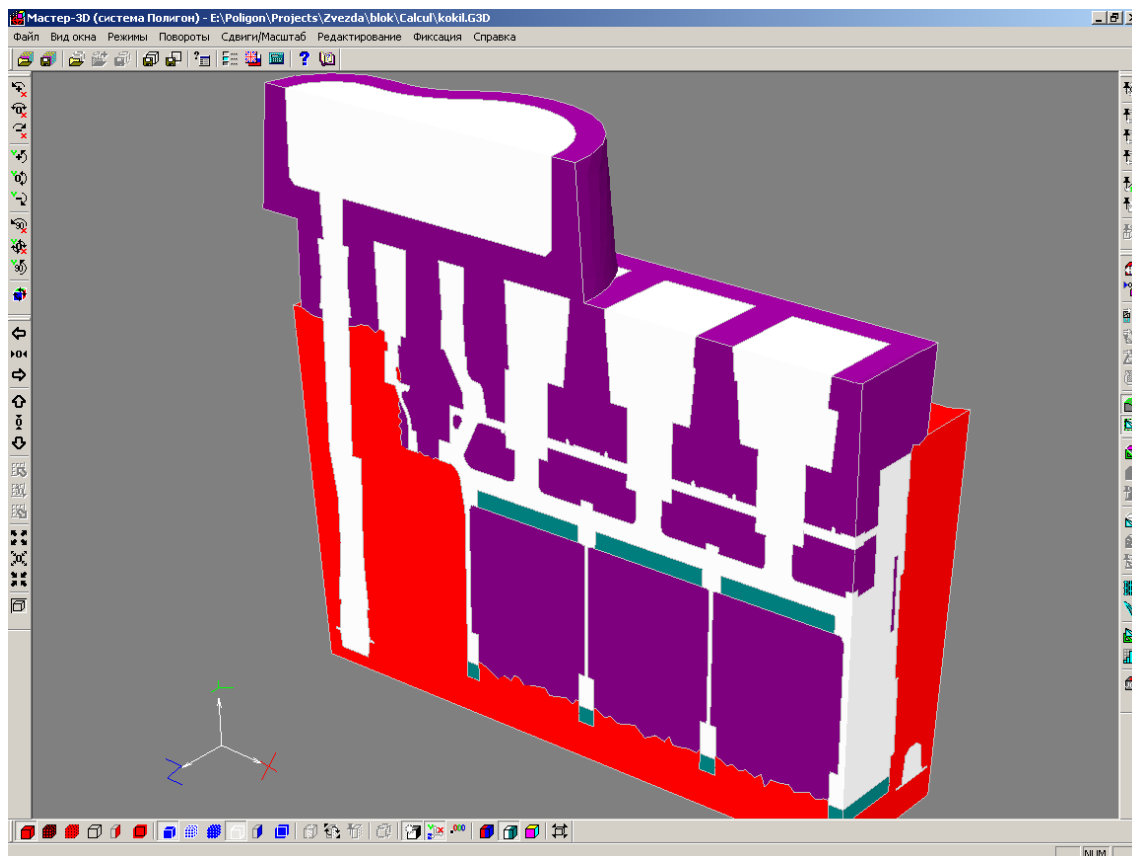
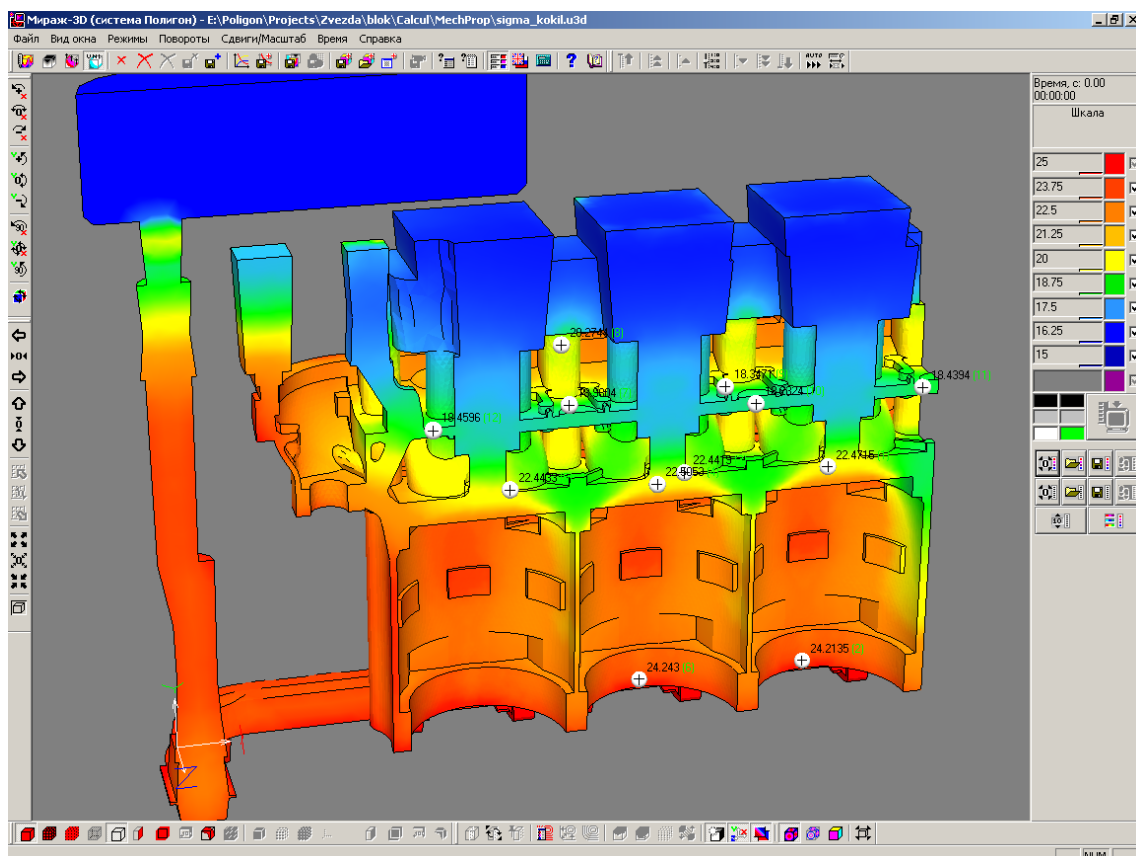
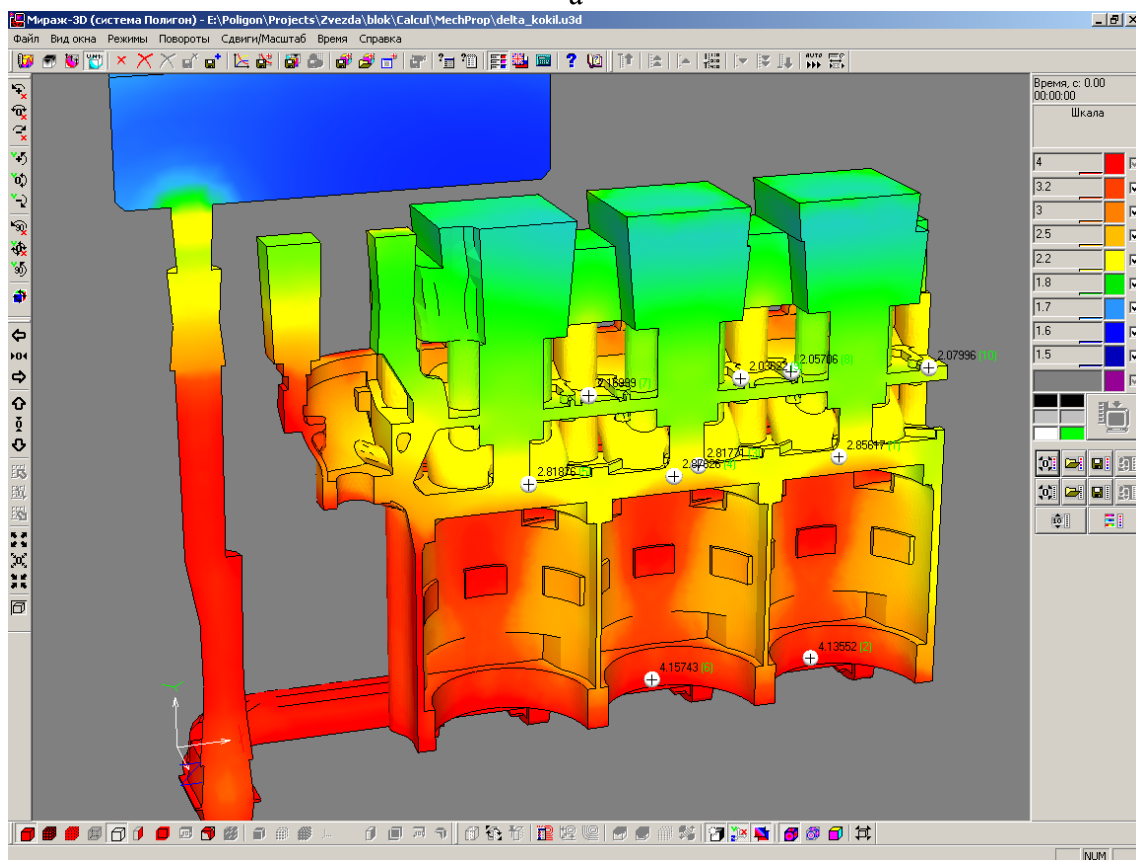


Рис. 3.15. КЭ-геометрия отливки и кокиля
(красным цветом показаны части, выполненные из СЧ)



а



б

Рис. 3.16. Механические свойства в теле отливки, изготовленной в кокиле
а – прочность ($\text{кгс}/\text{мм}^2$); б – пластичность (%)

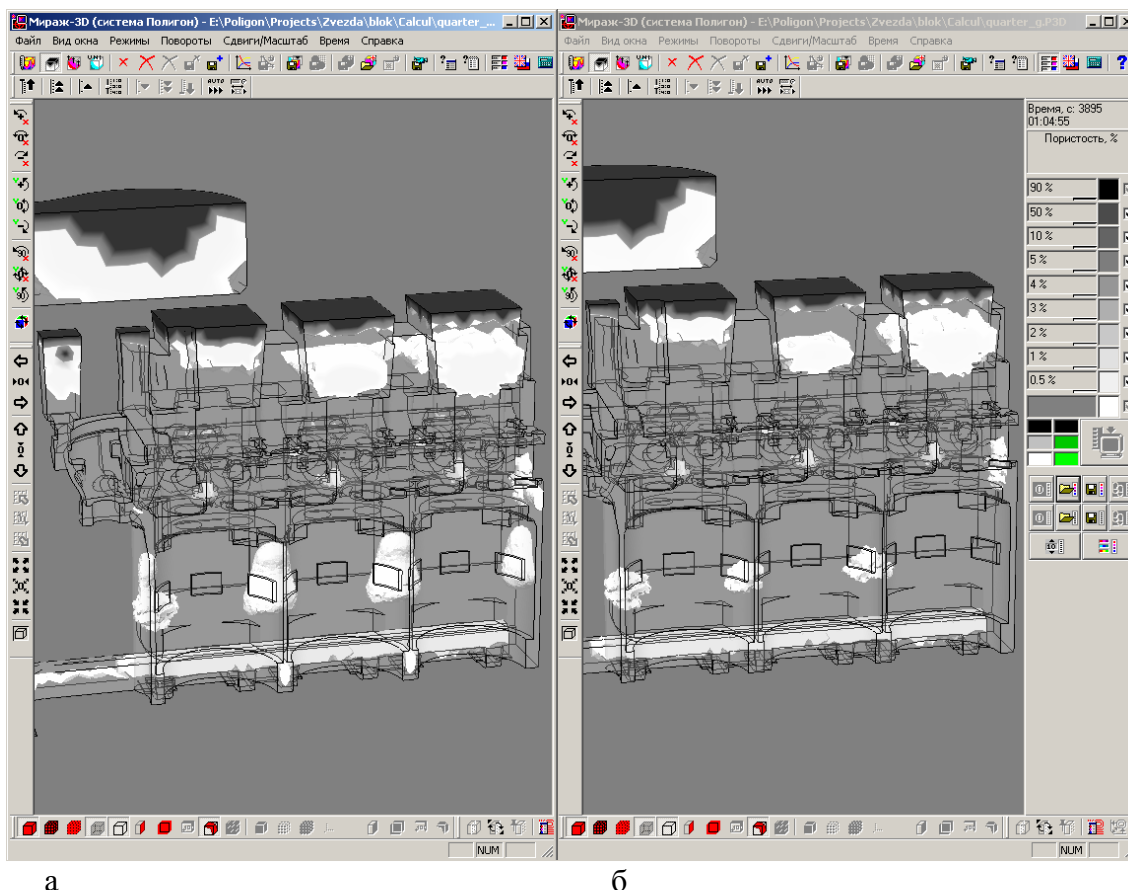


Рис. 3.17. Пористость свыше 0,5% в теле отливки (базовый вариант технологии), затвердевавшей в обычных условиях при атмосферном давлении (а) и в автоклаве при приложении давления в 5 атм. (б)

Была произведена оценка эффективности применения автоклавного литья. Применение автоклавного литья (рис. 3.17, б) позволяет избежать развития микропористости в теле отливки, проявляющейся при литье в условиях атмосферного давления (рис. 3.17, а), что особенно очевидно для зоны стоек.

3. Выводы по результатам моделирования

1. Анализ результатов гидродинамического расчёта позволяет сделать вывод о том, что заполнение происходит спокойно, завихрений, резких перепадов скоростей в полости формы не наблюдается. В соответствии с этим и особенностями подвода металла перепады температур в отливке по окончании заполнения невелики, наблюдается понижение температуры в отливке с нижних к верхним частям.
2. Анализ результатов расчётов по предложенной технологии выявил возникновение рыхлот не более 2% (около 3-го балла пористости) в массивных местах выше дна камеры сжатия и в «стойках» (рис. 2.7, а).
3. Мероприятия по установке дополнительных холодильников в зоне возникновения рыхлот (рис. 3.1, 3.4, в) дают положительный эффект (рис. 3.3, 3.5, в).
4. Замена материала холодильников, установленных в зоне дна камеры сжатия, на более высокотеплопроводный не даёт положительного эффекта по повышению уровня механических свойств (рис. 3.8) и понижает скорость охлаждения отливки, поскольку недостаточен объём холодильника и он слишком быстро прогревается (рис. 3.9).
5. Трёхкратное увеличение толщины холодильника, установленного в районе дна камеры сжатия, даёт прирост механических свойств в области дна камеры сжатия до требуемого уровня (рис. 3.11 и 3.13), независимо от материала холодильника (медь, чугун).

6. Путём незначительной корректировки технологии невозможно получить необходимые свойства в полке. Обеспечить необходимый уровень свойств в этой зоне возможно при заливке в кокиль (рис. 3.16).