



Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Машины и технология литейного производства»

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к курсовому проекту**

для студентов специальности 1-36 02 01

**«Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Электронный аналог печатного издания

Гомель 2007

УДК 621.74:519.711.3(075.8)

ББК 34.6:22.18я73

М34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
механико-технологического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 1 от 11.10.2005 г.)*

Авторы-составители: *А. В. Ткаченко, В. А. Жаранов*

Рецензент: канд. техн. наук, доц., зав. каф. «Инженерная графика»
ГГТУ им. П. О. Сухого *А. М. Селютин*

Математическое моделирование технологических процессов : метод. указания
М34 к курсовому проекту для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология
литейного производства» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост.: А. В. Ткаченко,
В. А. Жаранов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 51 с. – Систем. требования:
PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Win-
dows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://gstu.local/lib>. – Загл. с
титул. экрана.

ISBN 978-985-420-496-0

Содержат краткие сведения, необходимые для выполнения курсового проекта. При-
веден пример выполнения курсового проекта с подробным описанием последовательности
действий по моделированию гидродинамических процессов при заливке металла, тепловых
процессов при затвердевании отливки, образованию усадочных раковин.

Для студентов специальности 1-36 02 01 «Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.74:519.711.3(075.8)

ББК 34.61:22.18я73

ISBN 978-985-420-496-0

© Ткаченко А. В., Жаранов В. А.,
составление, 2007

© Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого», 2007

1. ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Современные тенденции в области литейного производства требуют создания высококонкурентоспособной продукции – литых заготовок, с максимальными показателями качества и минимальными затратами на процесс изготовления. Актуальный уровень развития вычислительных систем на базе ПЭВМ, компьютеров и суперкомпьютеров делает возможным создание программных комплексов для математического моделирования литейных процессов, решающих сложные технологические задачи.

В ходе выполнения итоговой работы по курсу «Математическое моделирование технологических процессов» – курсового проекта, студенты, опираясь на теоретические знания и навыки работы с программным обеспечением должны освоить технологию моделирования процесса затвердевания и охлаждения отливки. Кроме того, с помощью анализа результатов вычислительных экспериментов, необходимо выявить качественные и количественные характеристики дефектов, возникающих в отливках.

На этапе подготовки заданной отливки к проведению компьютерного анализа осуществляется трехмерное твердотельное моделирование геометрии отливки и формы, а также проводится генерация (создание) объемной конечно-элементной тетраэдрной сетки.

В качестве дополнительной задачи, решаемой студентами, выбран поиск способа оптимизации технологии изготовления отливки (выбор температурного режима, марки сплава, изменения геометрии модельной оснастки) с целью минимизации количества дефектов.

2. ЭТАПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Выполнение курсового проекта начинается с получения задания на проектирование. Задание по вариантам представлено в Приложении.

Далее идет этап теоретической подготовки к реализации поставленной в проекте задачи, в частности, проработка теоретического материала по теме «Моделирование литейных процессов» [2], [5], [6], [8].

В теоретической части пояснительной записки должны быть освещены следующие основные вопросы:

1. Современные тенденции в области математического моделирования технологических процессов в литейном производстве.

2. Краткое описание наиболее популярных отечественных и зарубежных программных продуктов, используемых для моделирования процессов литья.

3. Математический аппарат, используемый для решения задачи о затвердевании отливок.

4. Пример аналитического решения задачи о затвердевании отливки простой формы (плита, цилиндр, шар и др.). Желательно, чтобы для аналитического описания была выбрана форма отливки, по возможности близкая к отливке в задании на курсовой проект.

5. Математическое описание метода конечных элементов.

6. Краткая характеристика типа формы по заданию (кокиль, песчано-глинистая форма, оболочковая форма и др.)

7. Характеристика материала отливки (по заданию).

Кроме того, на данном этапе необходимо познакомиться с процессом анализа технологии литья в пакете ПОЛИГОН, в частности, выполнить ряд стандартных примеров, данных в документации к программе.

Следующим важным этапом выполнения курсового проекта является создание геометрии отливки и формы. На данном этапе используются возможности пакета твердотельного моделирования Solid Works. Поэлементно создается геометрия отливки и формы. Затем по исходным геометрическим данным генерируется полость, которую занимает отливка в форме, и полученная информация экспортируется в файл формата IGES для дальнейшей генерации конечно-элементной тетраэдрной сетки.

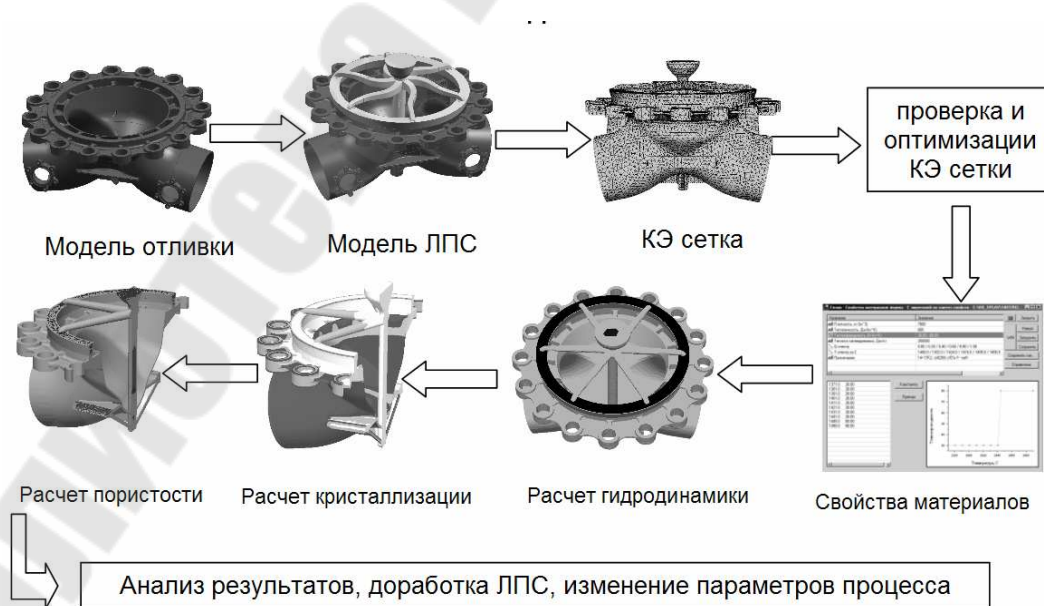


Рис. 1. Этапы моделирования

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЛИТЕЙНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В условиях рыночной экономики для выживания предприятий большое значение имеет снижение себестоимости продукции и уменьшение сроков разработки изделия. Одним из наиболее эффективных путей достижения этих целей является автоматизация деятельности предприятия на основе современных CAD/CAM/CAE/TDM/PDM-систем, реализующих концепцию комплексной автоматизации производства, т. е. охват всего технологического цикла. Но и локальная автоматизация отдельных участков технологического процесса также может принести существенную экономию материальных и временных затрат. Одним из таких участков является проектирование литейной технологии. Современное проектирование литейной технологии осуществляется с помощью CAD-систем и включает в себя построение трехмерных (3D) геометрических моделей детали, отливки с литниковой системой, а также литейной оснастки и изготовление по ним чертежной документации. Но для отработки литейной технологии на стадии проектирования без дорогостоящих натуральных экспериментов, а также для оптимизирования уже имеющейся технологии – конфигурации литниковой системы, прибылей, температуры и режима заливки и т. д., необходимо использовать CAE-системы. В настоящее время на многих зарубежных и некоторых российских машиностроительных предприятиях, имеющих литейное производство, используются те или иные CAE-системы компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП), позволяющие рассчитывать заливку, затвердевание и образование дефектов отливок для различных видов литья.

Первым этапом компьютерного анализа ЛП является построение 3D-модели отливки и формы. Большинство СКМ ЛП не имеют собственных средств построения 3D-моделей, поэтому необходимо приобретать еще и CAD-систему. CAD-системы высшего уровня (Pro/Engineer, Unigraphics, EUCLID3, CATIA и некоторые др.) предоставляют богатые возможности твердотельного и поверхностного моделирования, но слишком дороги. Из более доступных систем среднего уровня стоит особенно отметить SolidWorks, который прост в освоении, предоставляет мощные средства 3D-моделирования и имеет множество приложений, а также Solid Edge, IronCAD, CadKey, Mechanical Desktop, Think3, Vellum Solids и др. На тех предприятиях,

где уже имеются САD-системы, вопрос выбора не возникает – используется то, что есть. Следующим этапом является представление созданной 3D-модели в виде, необходимом для расчетов в СКМ ЛП. Существует три математических метода реализации представления геометрии в подобных системах анализа: метод конечных разностей (FDM), метод конечных элементов (FEM) и метод граничных элементов (BEM). С помощью FDM реализованы многие системы анализа ЛП (MAGMASOFT, AFS, CastCAE, LVMFlow и др.). Это вызвано простотой реализации данного метода, хотя он имеет существенный недостаток, заключающийся в искажении геометрии при ее ступенчатом представлении (например, периметр круга, представленного FDM, равен периметру описанного вокруг него квадрата), а также при большой разностенности отливок могут возникнуть трудности при адекватном описании геометрии, поэтому в универсальных САЕ-системах (таких как ANSYS, NASTRAN, ABAQUS, MARC и др.), где конкуренция очень сильна, он практически не находит применения. FEM позволяет описать геометрию с любой степенью точности, поэтому его применение представляется более предпочтительным (им реализованы такие системы, как ProCAST, SIMTEC, PASSAGE/PowerCAST, ПОЛИГОН и др.). Следовательно, для повышения точности моделирования следует выбирать систему, основанную на FEM. Метод граничных элементов является весьма перспективным, но пока он не нашел применения в СКМ ЛП. Все системы, основанные на FDM, имеют собственные генераторы сетки. Большинство систем, использующие FEM, также имеют встроенные генераторы сетки. Но некоторые системы не имеют 3D генератора сетки, в этом случае нужно использовать либо специализированные пре- и постпроцессоры (HyperMesh, FEMAP, GAMBIT), либо встроенные генераторы других FEA-систем (ANSYS, NASTRAN и др.), а затем импортировать модель в СКМ ЛП.

В различных областях науки и техники широко используется метод математического моделирования. Этот метод включает в себя разработку физических и математических моделей, численных методов и программного обеспечения, проведение численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники (его результаты анализируются и используются в практических целях). В технике и технологии преимущества метода математического моделирования очевидны: оптимизация проектирования, сокращение затрат на отработку, повышение качества продукции, уменьшение

эксплуатационных расходов и т. д. Математическое моделирование существенно преобразует также сам характер научных исследований, устанавливая новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами.

Применение математического моделирования в литейной промышленности привело к появлению большого числа программных пакетов, с помощью которых более или менее успешно решаются задачи, с которыми литейщики сталкиваются в повседневной практике.

В основе математической модели литейных процессов лежат уравнения тепломассопереноса: уравнения теплопроводности, Навье-Стокса, диффузии, кинетические уравнения фазовых превращений и т. д. Расчетная область включает не только объем, занимаемый расплавом, но также и формообразующую среду с различными граничными и начальными условиями. Возможен учет цикличности процесса литья (например, литье в кокиль).

Программы для моделирования литейных процессов, распространенные в настоящее время, в основном различаются степенью полноты учитываемых при моделировании факторов. Второе различие связано с методами получения и решения разностных уравнений: уравнения тепломассопереноса могут быть записаны в дифференциальном или интегральном виде.

Метод конечных разностей (МКР) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т. д.). Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит, намного упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но довольно существенно для уравнений гидродинамики. Метод также плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

Метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечного объема (МКО) базируются на уравнениях тепломассопереноса в интегральном виде. Область, в которой решаются уравнения, разбивается на элементы, внутри которых строятся аппроксиманты функций на

основе системы базисных функций, определенных на элементе. «Проектируя» интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Эта система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени. Преимущество МКЭ – хорошая аппроксимация границы, недостатки – необходимость добротного генератора конечных элементов, сложность уравнений, невозможность факторизации.

Модификации МКЭ пытаются соединить в себе простоту и факторизацию МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами.

Практика показывает, что оптимальный подход состоит не в выборе какого-то одного метода решения, а в использовании комбинации различных методов – это позволяет получить выигрыш в скорости, точности и адекватности получаемых результатов экспериментальным данным.

4. СИСТЕМА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ПОЛИГОН

Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) ПОЛИГОН позволяет провести отработку некоторых наиболее важных технологических параметров не на реальной отливке, а на ее компьютерной модели, что снижает затраты на проектирование и доводку литейной технологии.

Процессор. ПОЛИГОН позволяет моделировать следующие процессы. Тепловые процессы при затвердевании, образование усадочных раковин и макропористости, образование микропористости, гидродинамические процессы при заливке (система FlowVision), деформационные процессы для прогноза кристаллизационных трещин. Кроме того, формирование и расчет любых «критериев качества» для прогноза структуры, ликвации, механических свойств и т. п.

Базовые модели (затвердевание, усадка и др.), опираясь на реальную физику процессов, максимально универсальны по сплавам и способам литья. Сплавы: алюминиевые, магниевые, медные, чугуны, стали, никелевые и др. Способы: в землю, в кокиль (в т. ч. водоохлаждаемый), ЛВМ, ВПФ, ЛПД, ЛНД, жидкая штамповка, направленное затвердевание и др.

В то же время имеется ряд специализированных моделей и функций: моделирование циклических процессов, моделирование усадочных процессов при подводе металла под давлением при ЛНД и ЛПД, затвердевание в вакуумных печах при лучистом теплообмене, затвердевание с учетом подвода электрического тока и др.

Моделирование ведется на базе метода конечных элементов (МКЭ), который позволяет использовать наиболее адекватные физические и геометрические модели (ГМ). Все модели и функции реализованы для трехмерных (3D) ГМ. В решателях можно использовать не только прямой, но и итерационный метод расчета. Это позволяет в 10–15 раз уменьшить время расчета и требуемую оперативную память, что в сочетании с МКЭ делает доступным на персональном компьютере расчет отливок любой сложности.

Препроцессор. 3D-геометрический препроцессор ПОЛИГОНА при подготовке расчетных ГМ позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, ANSYS 4.4-5.3, ProCAST, Nastran, GiD, Pro/Mesh, StressLab, генератор Unigraphics и др. Для генерации 3D конечно-элементных сеток совместно с ПОЛИГОНОМ могут поставляться автоматические генераторы сеток FEMAP или GiD, которые использует исходные ГМ в форматах IGES, PARASOLID, VDA FS, STL и др. Это позволяет совместно с ПОЛИГОНОМ использовать все наиболее популярные 3D CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, КОМПАС, EUCLID, CATIA, Cimatron, CADD5 и др.

Ввод свойств осуществляется из прилагаемой базы данных по сплавам и материалам, которую технолог может легко дополнять и редактировать. Подключен обширный справочник по свойствам литейных сплавов и материалов. Имеются средства автоматической генерации свойств сплавов (алюминиевые, серые чугуны и др.) по химическому составу.

Постпроцессор. Постпроцессоры ПОЛИГОНА позволяют представлять результаты расчетов в самом различном виде: трехмерном, двумерном, цветовым окрашиванием с одновременным учетом температуры и освещенности, в виде изоповерхностей, векторных полей, изолиний, оцифрованных точек, графиков и т. д. В 3D-постпроцессоре используются современные графические библиотеки. Это позволяет проводить все визуальные операции на 3D-объектах с высокой скоростью и наглядностью. Кроме того, возможна обработка расчетных тепловых полей по любым задаваемым пользователем математическим критериям.

5. ИНТЕРАКТИВНЫЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ ПРЕ- И ПОСТПРОЦЕССОР ALTAIR HYPERMESH

Altair HyperMesh – это высокоэффективный конечно-элементный пре- и постпроцессор для основных конечно-элементных решателей. Тщательно продуманный интерфейс позволяет эффективно осуществлять чистку и правку геометрии сложных CAD-моделей с последующим автоматическим нанесением сеток или осуществлять внесение изменений в существующую сетку. HyperMesh предлагает взыскательным пользователям максимум производительности и гибкости. Возможность приложения нагрузок и закреплений, которые задаются с учетом особенностей решателя, а также широкие возможности в области постпроцессинга делают программу полноценным инструментом КЭ моделирования.

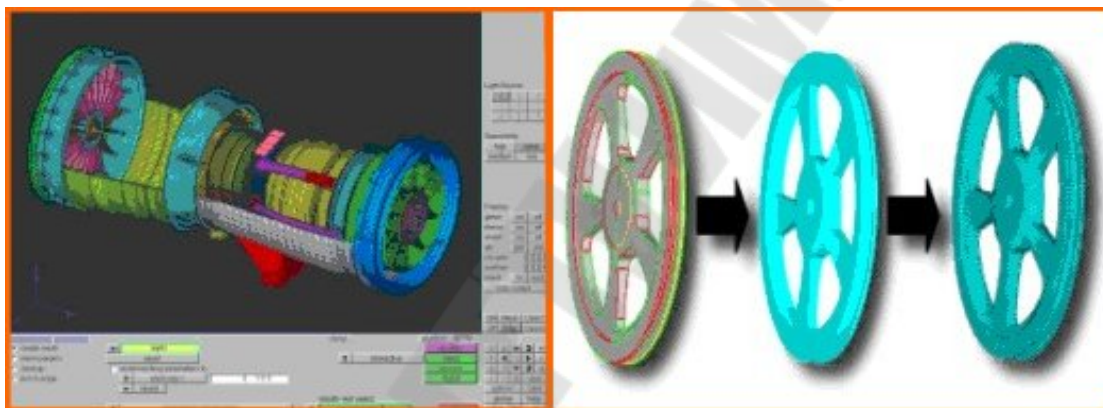


Рис. 2. Твёрдотельная модель и этапы создания конечно-элементной сетки

Быстрый импорт и подготовка CAD-данных. HyperMesh предлагает надежные трансляторы для большинства распространенных форматов CAD: Catia, Unigraphics, Pro/E STEP, IGES, VDA.

Зачастую CAD-данные имеют низкое качество, из-за чего являются непригодными для непосредственного нанесения сетки. HyperMesh располагает широким спектром возможностей (в числе прочего автоматическое создание средних поверхностей), которые позволяют исправить и подготовить импортированную геометрию к нанесению сеток.

Модуль создания средних поверхностей. Модуль позволяет создавать модель средних поверхностей из объёма путём обработки информации о толщине стенок детали. В зависимости от сложности исходной геометрии средние поверхности могут создаваться в автоматическом или ручном режиме. Возможности редактирования в руч-

ном режиме позволяют вносить исправления в проблемные области модели и обеспечивать связность между соседними поверхностями.

Эффективное создание и изменение сеток. HyperMesh создает сетки всех типов элементов с высоким качеством. Например, модуль автомешинга позволяет не только автоматически построить сетку, но и создать ее с заданным качеством. Отдельные области сетки, а также уже существующие сложные сетки могут подвергаться дополнительным изменениям с учетом индивидуальных требований (качества элементов, длины ребра). Множество новых модулей полезно дополняют перечисленные функции: так, HyperMorph позволяет проводить интерактивное изменение существующей сетки с минимальными искажениями и незначительной потерей качества элементов. Новый модуль коннекторов облегчает создание и работу со сварными точками (в том числе и не зависящими от сетки). Новая возможность воссоздания САД-геометрии по сеткам пополняет спектр возможностей программы. Замыкает список функций HyperMesh возможность создания структурированной и неструктурированной гексаэдрической сетки.

Возможности импорта и экспорта расчетных пакетов. HyperMesh предлагает широкий спектр трансляторов для распространенных КЭ решателей: OptiStruct, NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, LS-Dyna, PamCrash и др.

HyperMesh позволяет создавать для большинства задач готовые к расчету модели под выбранный КЭ решатель. Приложение нагрузок и граничных условий, а также задание сложных свойств материала и параметров расчета осуществляются с учетом особенностей решателя. Разумеется, существующие вводные КЭ данные могут импортироваться и изменяться. При помощи интегрированного редактора карт в HyperMesh может осуществляться просмотр КЭ синтаксиса, предназначенного для экспорта. Специальные профили пользователя обеспечивают улучшенную связь интерфейса HyperMesh с соответствующим КЭ решателем, например, при помощи макроса, привязанного к решателю.

6. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Исходную конечно-элементную модель (система «отливка – литниковая система – форма») для реализации численного моделирования процессов кристаллизации и охлаждения отливок получаем методом моделирования твердотельной трехмерной геометрии в програм-

ме SolidWorks (рис. 3), далее через формат обмена данными между CAD/CAE/CAM системами – IGES (рис. 4) производим передачу данных в пакет Altair HyperMesh. В модуле HyperMesh производим генерацию конечно-элементной сетки и передачу ее в ПОЛИГОН в формате HYPERMESH.

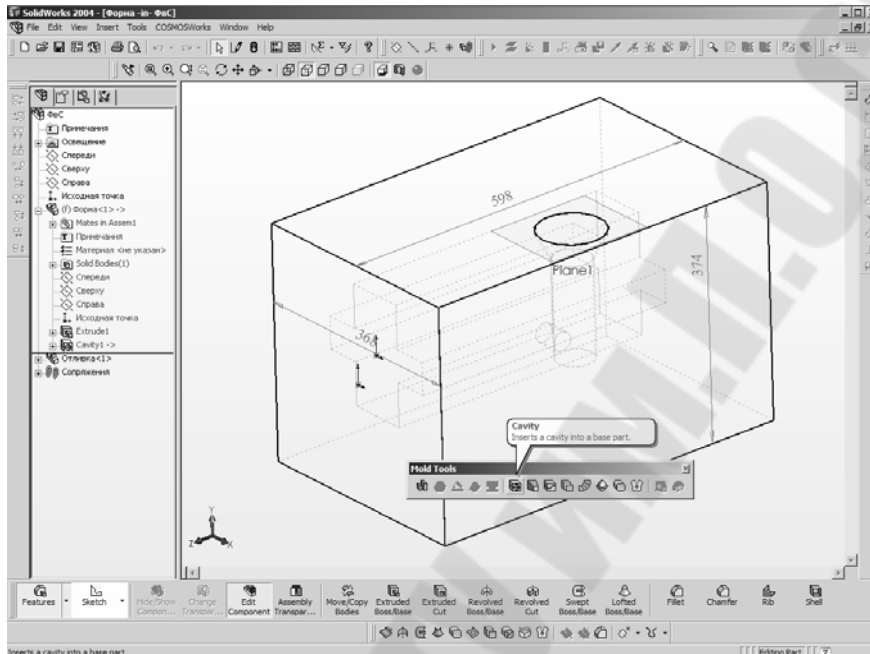


Рис. 3. Твёрдотельная модель системы «отливка – литниковая система – форма» в программе SolidWorks

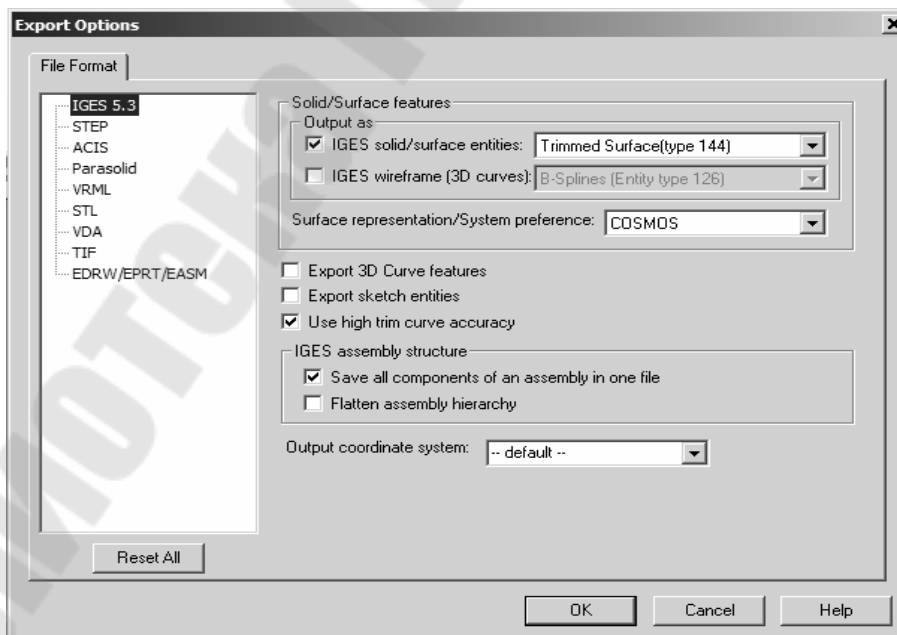


Рис. 4. Окно установки параметров экспорта геометрии из программы SolidWorks

Конечно-элементные сетки получены в системе HyperMesh и находятся в файле **forma.hyp**.

Работа в **ПОЛИГОНЕ** начинается с работы в модуле Мастер-3D. Главная задача этого модуля – импортировать конечно-элементную модель, созданную с помощью внешнего генератора сеток, проверить и при необходимости, по возможности, поправить ее, назначить типы объемов и проиндексировать конечные элементы и границы объемов и, наконец, сохранить модель в формате ПОЛИГОНА.

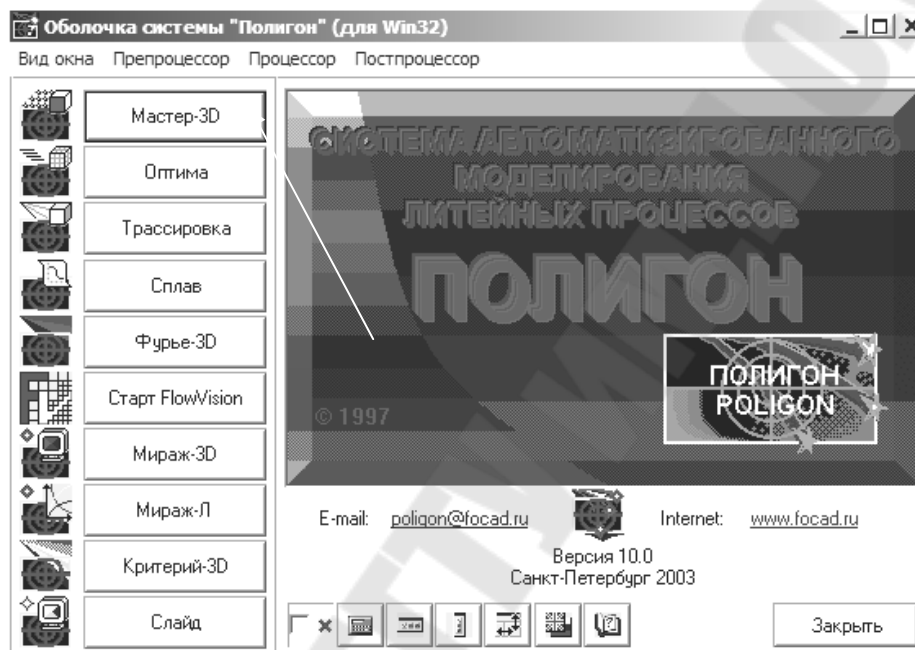


Рис. 5. Главное окно запуска программы ПОЛИГОН

Во-первых, необходимо обозначить, какая часть геометрии представляет из себя затвердевающий металл – отливку, а какая часть относится к форме со всеми объектами составляющими ее: основной формообразующей частью. То есть необходимо разделить геометрическую модель по типу принадлежности – «отливка или форма». Во-вторых, надо произвести индексацию элементов и их граней. Под индексацией понимается возможность присвоить каждому конечному элементу сетки и его граням определенный индекс, в соответствии с которыми в дальнейшем и будут назначаться свойства материалов, граничные условия и т. п. Например, элементы, образующие песчаный стержень, обладают одними свойствами, а элементы, образующие наружный металлический холодильник, – другими. Соответственно они должны иметь разные индексы. Точно так же характеристики граней элементов принадлежат к нескольким различным видам: одно дело – грань между отливкой и формой, и совсем другое дело – грань между формой и внешней средой.

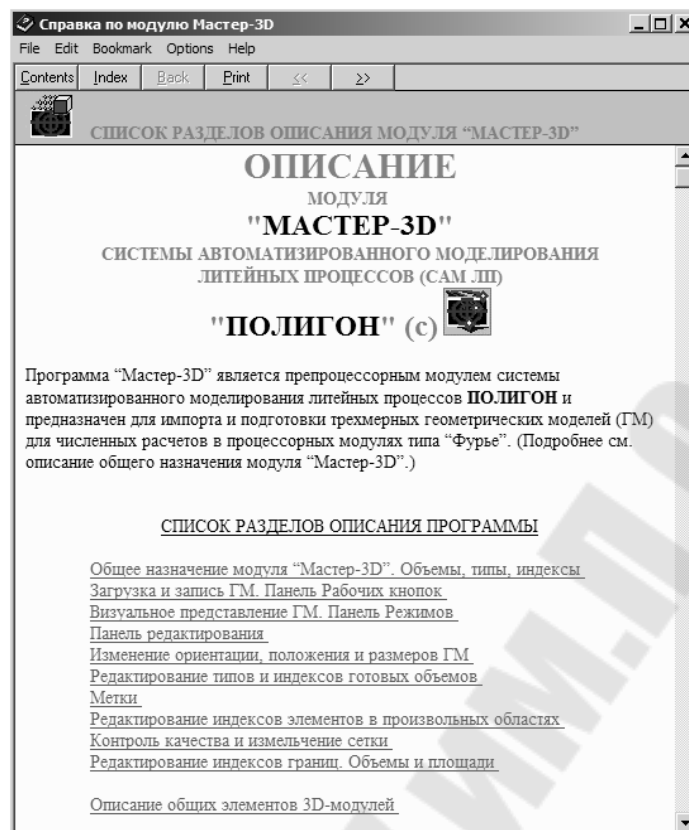


Рис. 6. Окно справки

(В любом модуле программы ПОЛИГОН вызывается клавишей F1.)

В модуле Мастер-3D необходимо выполнить следующие операции. Загрузка (импорт) конечно-элементной модели. Назначение отливки и формы. Назначение индексов элементов и их граней. Проверка модели на качество и соответствие условиям. Сохранение в формате ПОЛИГОНА.

Для запуска модуля нажимаем на кнопку Мастер-3D в окне оболочки системы и перед вами будет открыто рабочее окно модуля.

Если при загрузке программы видны не все панели, то недостающие панели можно сделать видимыми, поставив в нужных местах «галочки» в меню Вид окна.

Для того чтобы загрузить конечно-элементную модель, следует нажать на кнопку загрузки, расположенную на панели Рабочих кнопок. Можно также воспользоваться командами меню «Файл – Загрузить файл геометрии».

До начала собственно чтения модели появится диалог Параметры загрузки. В нем с помощью радиокнопок следует выбрать формат файла, который вы предполагаете загрузить. Мы выбираем формат файла HyperMesh.

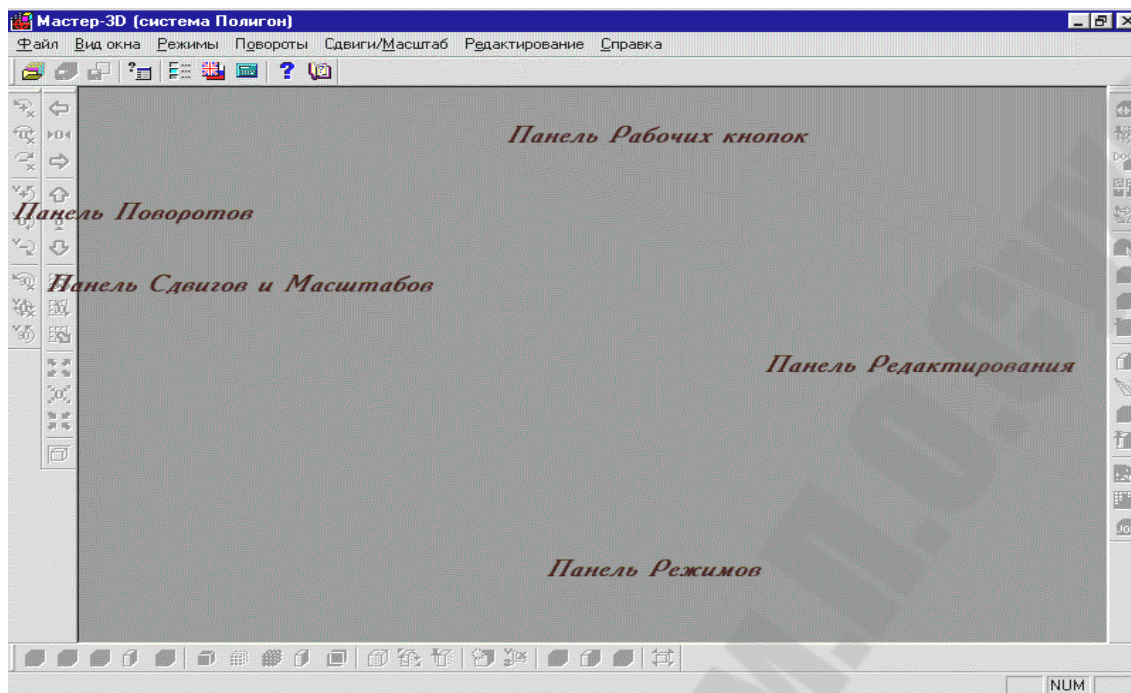


Рис. 7. Рабочее окно модуля Мастер-3D

Перед загрузкой соответствующего файла необходимо установить правильный масштабный коэффициент.

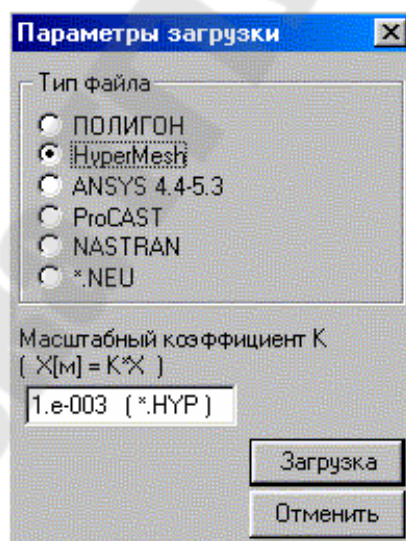


Рис. 8. Выбор формата файла для импорта

После нажатия на кнопку **Загрузка** будет открыт стандартный диалог Windows для выбора файла с конечно-элементной моделью. В нашем примере загружаем файл forma.hyp.

По окончании загрузки в рабочем поле возникнет изображение конечно-элементной модели, а большинство ранее отключенных кно-

пок на панелях управления станут доступны. При импорте конечно-элементной сетки Мастер-3D первому найденному объему всегда присваивает тип «отливка», а остальным объемам – тип «форма». При этом, естественно, могут возникать несоответствия назначения.

Для того чтобы произвести переназначение индексов или типов объемов, следует воспользоваться кнопкой Назначить Отливку/Форму/Индекс на Панели Редактирования.

После нажатия на нее будет открыто окно Назначение параметров (рис. 9).

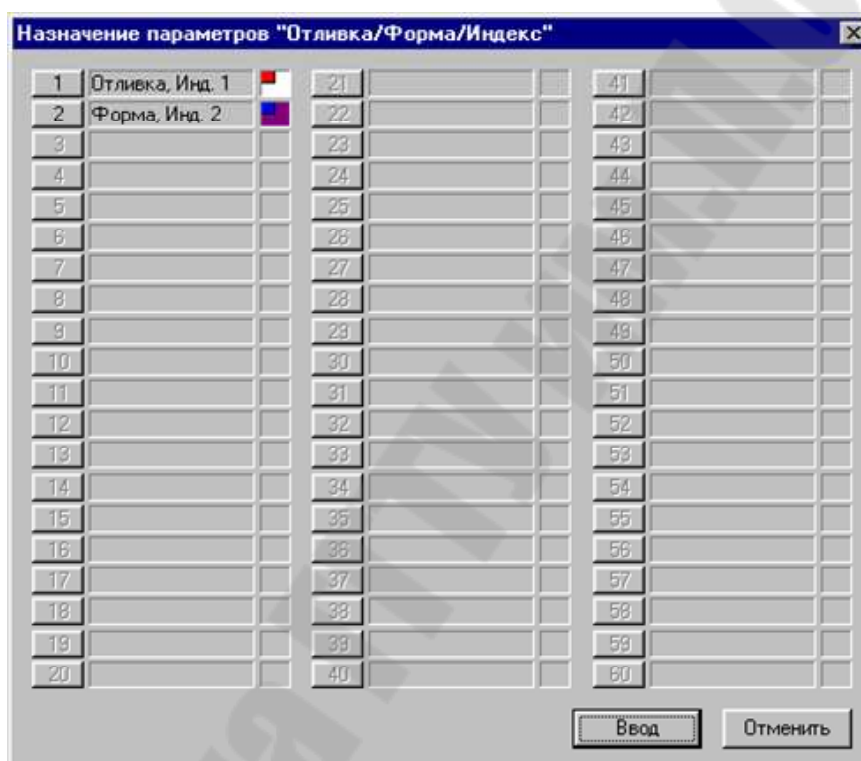


Рис. 9. Окно назначения параметров объемов модели

В диалоге в табличной форме представлен список всех существующих объемов в модели. Для каждого объема определен его тип – принадлежность к отливке или форме и индекс, который он имеет в настоящий момент. Фон цветового индикатора показывает, какой условный номер присвоен всем элементам данного объема (индекс), а цвет маленького квадратика в верхнем левом углу индикатора указывает на принадлежность объема к отливке или форме (тип). Такими же цветами будет закрашиваться данный объем на геометрической модели объекта в соответствующих режимах визуализации (режим визуализации индекса или режим визуализации типа). Нажимая на кнопку с номером объема, мы попадаем в диалог Параметры объема.

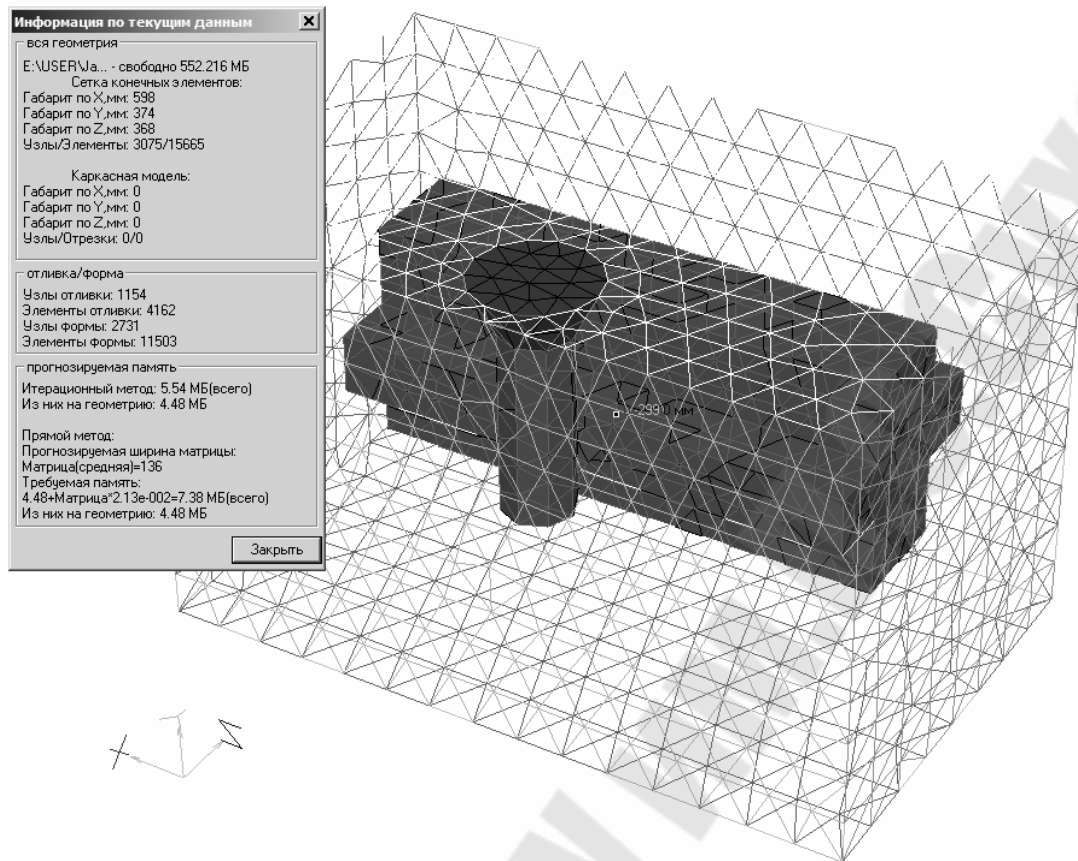


Рис. 10. Вид конечно-элементной модели системы «отливка – литниковая система – форма»

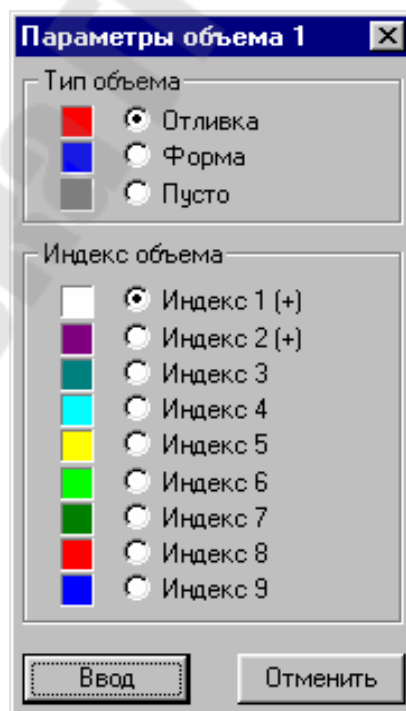


Рис. 11. Окно задания параметров объемов

В заголовке окна будет указан порядковый номер объема, в нашем случае – 1. Три радио-кнопки в верхней части окна позволяют установить тип текущего объема, а расположенные ниже 9 радио-кнопок – его индекс. (Тип Объема «пустота» говорит, что этот объем будет убран из модели.) Значок (+), стоящий справа от номера индекса, показывает, что этот индекс уже задействован в модели.

Закончив поочередное редактирование параметров объемов, применим результаты редактирования к модели нажатием на кнопку **Ввод** в окне **Назначение параметров**.

Необходимо физически верно сориентировать модель. Это следует сделать потому, что вектор силы тяжести в расчетах ПОЛИГОНА всегда направлен противоположно оси Y. Очевидно, что в случае неверной ориентации модели, мы получим неверные результаты. В нашем примере модель должна быть повернута на 90° вокруг оси X. Воспользуемся кнопками на **Панели Поворотов**.

Поворот выполняется в два этапа. На первом этапе необходимо визуально повернуть модель.

Это удобно сделать, нажав последовательно кнопки **Углы по X** и **Y = 0** и **Угол по X + 90°**.

На втором этапе поворот модели фиксируется нажатием на кнопку **Зафиксировать угол** на **Панели Редактирования**, а затем – в страховочном диалоге нажатием на кнопку **Загрузить угол**.

Итак, было показано как **присвоить** конечным элементам, из которых состоят объемы **типы** и **индексы**.

Далее необходимо присвоить индексы граням конечных элементов. (Не путать с индексами самих элементов.) Напомним, что под одним индексом объединяются грани, образующие границы (поверхности), разделяющие объемы конечных элементов с одинаковыми свойствами. Всего индексов граням конечных элементов может быть назначено 10, и они нумеруются цифрами от 0 до 9. При этом считается, что грани с индексом 0 – это границы внутри тела (или границы симметрии), границы от 1 до 7 – границы между отливкой и формой, а границы 8 и 9 – границы со средой.

При загрузке конечно-элементной сетки, подготовленной в программе-разбивщике, **Мастер-3D** группирует конечные элементы в объемы и определяет границы их раздела. Граням конечных элементов, образующим внешние границы отливки и формы, присваиваются некоторые индексы отличные от нуля, а всем остальным – внутренним – граням – нулевой индекс.

Для того чтобы наглядно увидеть сформированную систему граничных индексов, следует воспользоваться кнопкой **Показать Индексы Границ на Панели Режимов**.

После нажатия на нее границы с различными индексами будут окрашены в различные цвета.

В рабочем поле мы видим три границы раздела:

1) красного цвета – границу раздела между конечными элементами, образующими форму, и окружающей средой;

2) лилового цвета – границу раздела между конечными элементами, образующими отливку, и конечными элементами, образующими форму;

3) синего цвета – границу раздела между конечными элементами, образующими отливку, и окружающей средой.

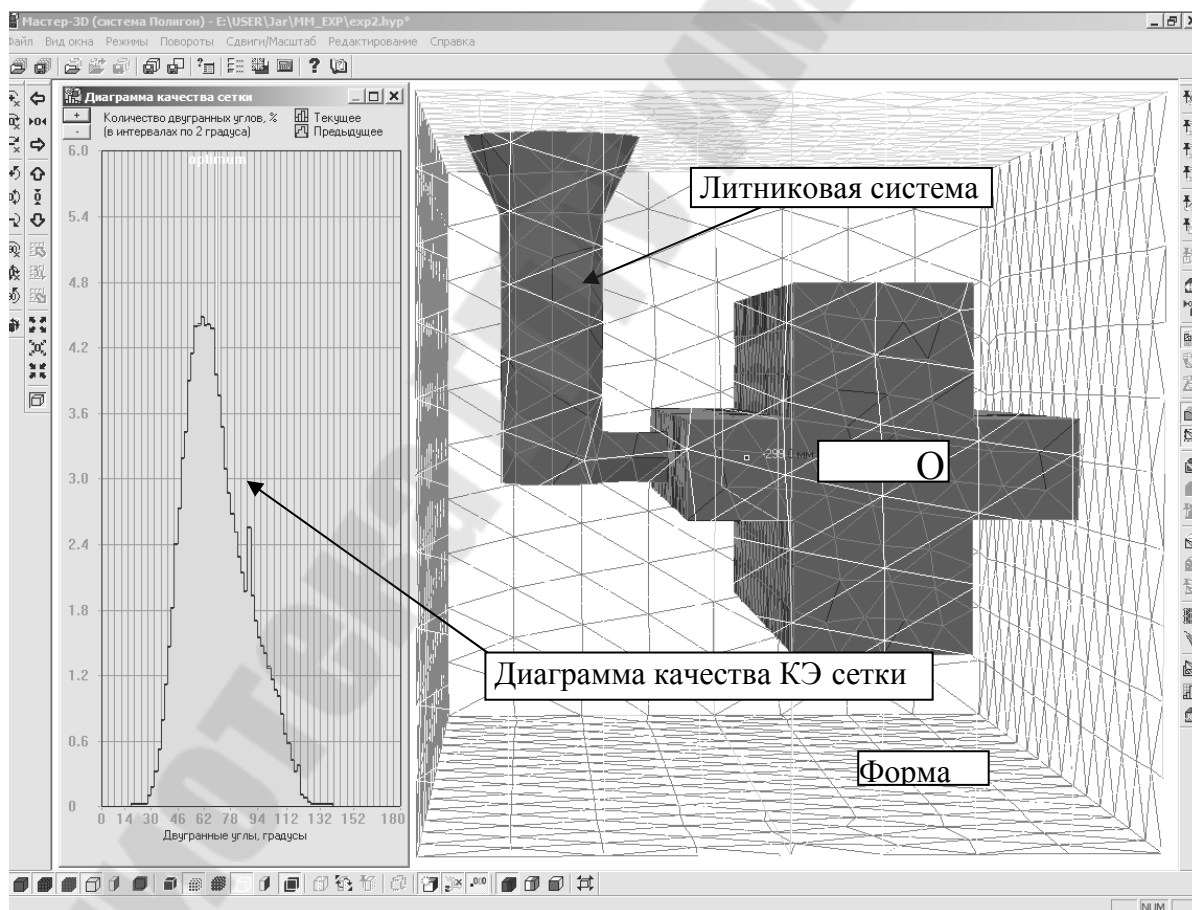


Рис. 12. Конечно-элементная модель с диаграммой качества конечных элементов

В ПОЛИГОНЕ граница раздела между двумя объемами представляется двумя слоями. Например, граница между отливкой и формой может состоять, с одной стороны, из граней конечных элементов отливки, соприкасающихся с формой, а с другой стороны, из граней конечных элементов формы, соприкасающихся с отливкой. Эта последняя граница, проще говоря, – поверхность той полости, которую оставила бы отливка после ее удаления в форме.

Если мы, манипулируя кнопками управления сечением и представлением модели на **Панели Режимов**, «удалим» отливку, то отлично увидим эту границу (точнее говоря, ее половинку), окрашенную в светло-лиловый цвет.

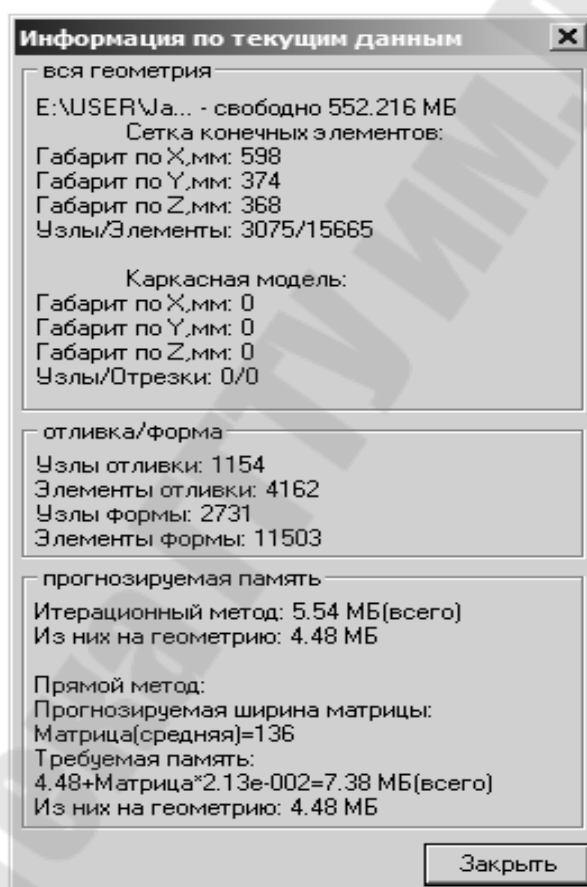


Рис. 13. Информация по текущим данным модели

Грани конечных элементов при первоначальной разбивке на граничные поверхности могут быть сгруппированы неверно. Это происходит из-за того, что при загрузке неизвестно что на самом деле является отливкой, а что формой и присвоение типов «отливка/форма» и соответственно индексов границ проходит произвольно. Самый простой способ назначить «правильные» границы – воспользоваться

автоматической установкой индексов границ. Естественно, это надо делать ПОСЛЕ «правильной» установки типов «отливка/форма».

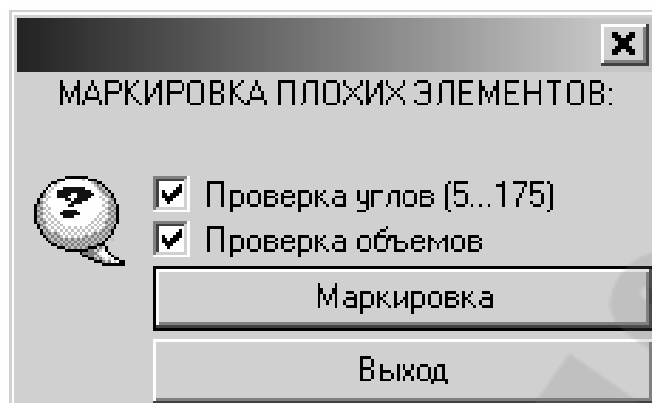


Рис. 14. Маркировка плохих элементов позволяет пользователю определить зоны модели с некачественной генерацией сетки

В этом случае программа исходит из установленных типов элементов модели и самостоятельно назначает индексы границ: 1) отливка/среда – индекс 8, красный цвет; 2) форма/среда – индекс 9, синий цвет; 3) отливка/форма, со стороны отливки – индекс 1, светло-лиловый цвет; 4) отливка/форма, со стороны формы – индекс 2, темно-лиловый цвет; 5) внутренние границы – индекс 0, серый цвет.

Необходимо выполнить операцию автоматического присвоения индексов границ.

Назначение стандартных индексов граней осуществляется нажатием на кнопку **Задать Стандартные Границы** на **Панели Редактирования**.

«Вынем» отливку из формы и убедимся, что индекс границы раздела отливка/форма со стороны формы тоже назначен верно.

Для сохранения результатов на **Панели Рабочих кнопок** имеется кнопка **Записать файл геометрии**. Нажатие на нее сохранит геометрическую модель со всеми назначенными индексами во внутреннем формате **ПОЛИГОНА – G3D**, в котором она готова к расчету в модуле **Фурье 3D**. Назовем файл геометрической модели **forma.G3D**.

Следующим этапом моделирования является собственно выполнение расчетов в модуле **Фурье**.

Работа модуле в **Фурье**. После подготовки геометрической модели в модуле **Мастер** ваша работа должна быть продолжена в модуле **Фурье**. Главная задача этого модуля – выполнение числен-

ного расчета температурных полей отливки и формы, фазовых полей отливки, пористости и раковин в отливке.

Работа в **Фурье** осуществляется в несколько последовательных этапов:

1. Загрузка всех необходимых исходных параметров.
2. Собственно расчет и визуализация его результатов.
3. Сохранение результатов расчетов.

Фурье запускается нажатием на соответствующую кнопку в окне оболочки системы.

Через несколько секунд вам будет открыто рабочее окно модуля. Для того чтобы загрузить исходные данные, следует нажать на кнопку **Загрузка Исходных Данных** на Панели Рабочих кнопок. Откроется диалоговое окно **Исходные Данные для расчета**. Окно разделено на две большие области: **ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ** и **ФАКУЛЬТАТИВНЫЕ ДАННЫЕ**. Для моделирования рассматриваемого примера нам будет достаточно обязательных исходных данных. Работу в области обязательных данных вам следует начать с однотипных разделов «отливка» и «форма». В каждом из них расположены три поля ввода:

- Нач.Т верх, С – начальная температура в верхней точке, в градусах Цельсия.
- Нач.Т низ, С – начальная температура в нижней точке, в градусах Цельсия.
- Т среды, С – температура среды, в градусах Цельсия.

Под начальной температурой понимается температура в момент окончания заполнения полости формы жидким металлом. При задании температурного распределения по двум точкам – верхней и нижней – предполагается, что температура по высоте отливки меняется линейно.

Установим в разделах «отливка» и «форма» также флажки **Запись файла**, означающие, что результаты расчетов соответствующих температурных полей будут сохранены в виде отдельных файлов.

Справа от описанных разделов размещается раздел «шаг/конец расчета». Под шагом расчета понимается интервал времени (в секундах), через который в расчете фиксируются значения доли жидкой фазы, температуры отливки и формы. Минимальный шаг расчета, допустимый в программе, составляет 0,01 с. Мы задаем его равным 10 с.

В общем случае шаг расчета подбирают таким образом, чтобы полное время расчета разбивалось на 120–150 шагов.

Конец расчета может быть задан двояко: либо прямым назначением времени окончания расчета, либо указанием, что расчет заканчивается при температуре солидуса. Нажмем радиокнопку **Конец**: по Тсол. Это означает, что расчет будет вестись до тех пор, пока максимальная температура отливки (температура в самой горячей точке) не станет ниже температуры солидуса, т. е. до момента полного затвердевания.

Далее предстоит определить ряд файлов, в которых программа найдет необходимые для расчета данные или сохранит его результаты. Для этого служат кнопки, расположенные в нижней части раздела **ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ**.

Кнопка **Файл результатов** предназначена для указания имени файла, в котором будут сохранены результаты расчетов. Нажатие на нее откроет стандартное для Windows-приложений окно сохранения файла. При этом температурные поля формы автоматически будут записаны в файл с расширением MLD, а температурно-фазовые поля отливки – в файл с расширением CST. После сохранения файла результатов его имя и полный путь будут индцированы справа от кнопки **Файл результатов**. Отметим, что если файл с заданным вами именем уже имеется на диске, то в этой строке появится предупреждающая надпись **ПОВЕРХ**.

Кнопка **Файл геометрии** открывает стандартное для Windows-приложений окно загрузки. В программе **Мастер** мы создали файл геометрии forma.G3D. Найдем его на диске и выполним загрузку.

Аналогичным образом выполняется загрузка файлов свойств сплава и формы. Это файлы с расширениями BD – для отливки и BDF – для формы. Эти файлы присутствуют в стандартной базе данных ПОЛИГОНА. Обычно они находятся в папке POLIGON/BD. В нашем примере мы используем свойства чугуна марки СЧ-25 и металлической формы (кокиля): СЧ-25.bd и Stal.bdf.

Точно так же осуществляется загрузка файла теплопередачи Standart.afo. Отметим, что в этом файле содержится информация о теплопередаче на границах раздела, имеющихся в нашей модели.

На этом подготовка обязательных исходных данных завершена, и следует ввести их нажатием на кнопку **Ввод** в нижнем правом углу окна. По окончании загрузки в рабочем поле программы появится изображение нашей модели.

Исходные Данные для расчета

ОБЯЗАТЕЛЬНЫЕ ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

отливка	форма	шаг/конец расчета
<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла	<input checked="" type="checkbox"/> Запись файла	<input type="radio"/> Конец: по Tсол
Нач. T верх,С	Нач. T верх,С	<input type="radio"/> Конец: по Времени
Нач. T низ,С	Нач. T низ,С	<input checked="" type="radio"/> Конец: по Tконца
T среды,С	T среды,С	Шаг расчета,с
		Нач. Время,с
		Время конца,с
		Tконца,С

Файл результатов: E:\USER\Jar\MM_EXP\RESULT (П О В Е Р Х !)
 Файл геометрии: E:\USER\Jar\MM_EXP\exp2.G3D
 Файл свойств сплава: E:\Polygon\BD\CH25.bd
 Файл свойств формы: E:\Polygon\BD\STAL.BDF
 Файл теплопередачи: E:\Polygon\BD\STANDART.AFO

ФАКУЛЬТАТИВНЫЕ ДАННЫЕ

Файл начальных T_о
 Файл начальных T_ф
 Сдвиг,мм: X 0 Y 0 Z 0 Козф.Расширения 1
 Файл задаваемых T
 Файл тепловых потоков
 Файл электро-свойств
 Файл лучеисп.(перемещ.)
 Файл динамич. среды
 Использовать для зон Среды коэф-ты из Файла Теплопередачи

Без комментария

Список всех данных Ввод Закрыть

Рис. 15. Задание исходных данных для расчета

Цветовое решение картинки отличается от картинок, с которыми мы имели дело в **Мастере**. Это связано с тем, что в **Фурье** раскраска отражает не типы или индексы объемов и граней, а температурно-фазовые поля или поля пористости. Используемые при этом цветовая шкала и палитра размещаются по умолчанию в правой части окна.

На рис. 15 мы видим шкалу и палитру температурно-фазовых полей. За ее включение отвечает кнопка **Показать поля Температур** на **Панели Режимов**.

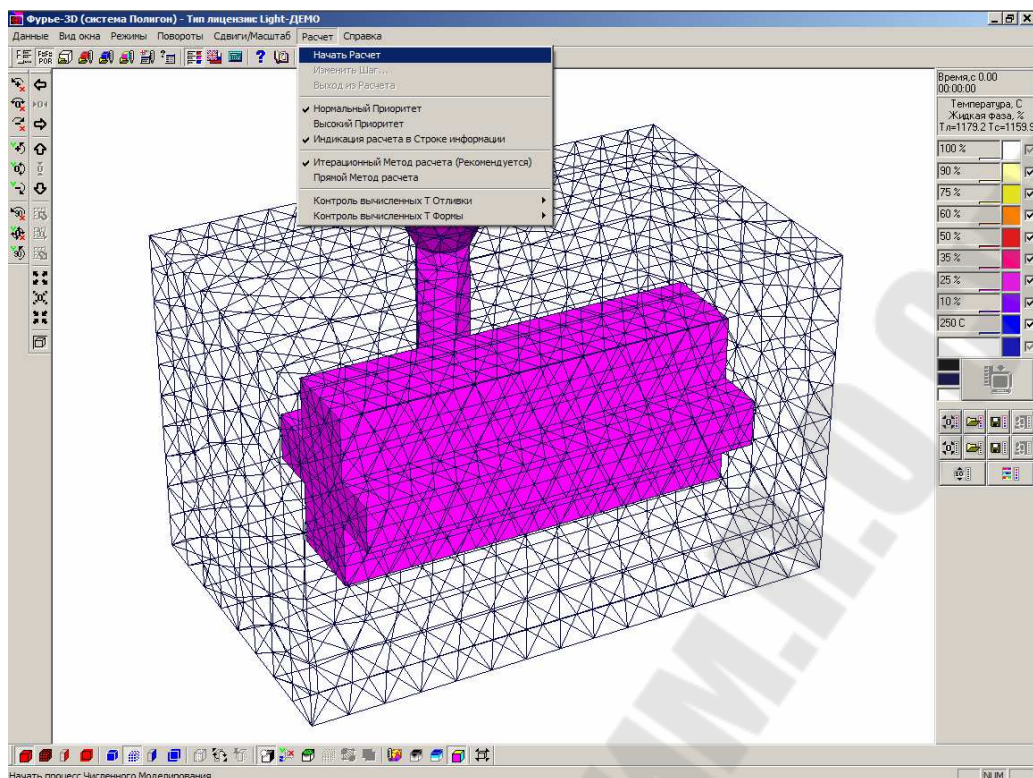


Рис. 16. Окно программы после ввода исходных данных

Ориентируясь на шкалу и палитру, можно сказать, как Фурье воспринимает исходные условия для расчета: форма – темно-синяя окраска – находится в самом холодном состоянии (ниже 200 °С – так настроена шкала), а отливка – белая окраска – заполнена абсолютно жидким металлом.

Поскольку нас интересует не только тепловая, но и усадочная задача, нам следует ввести ряд дополнительных параметров, необходимых для расчета макро- и микропористости. Принципиально важно понимать, что расчеты пористости и усадки не могут быть выполнены без базовых температурно-фазовых расчетов, и поэтому ввод исходных данных по основным теплофизическим характеристикам модели является обязательным. Данные же по пористости необходимы только в тех случаях, когда будет выполняться именно расчет усадочной задачи. Для ввода этих данных воспользуемся кнопкой **Ввод Данных по Пористости**.

В верхней части открывшегося окна **Данные для расчета Пористости** слева расположены флажки **Расчет МАКРОпористости** и **Расчет МИКРОпористости**. Устанавливая или снимая флажки, вы

определяете виды расчетов, которые будут выполнены. Нас интересуют оба расчета, поэтому мы установим оба флажка.

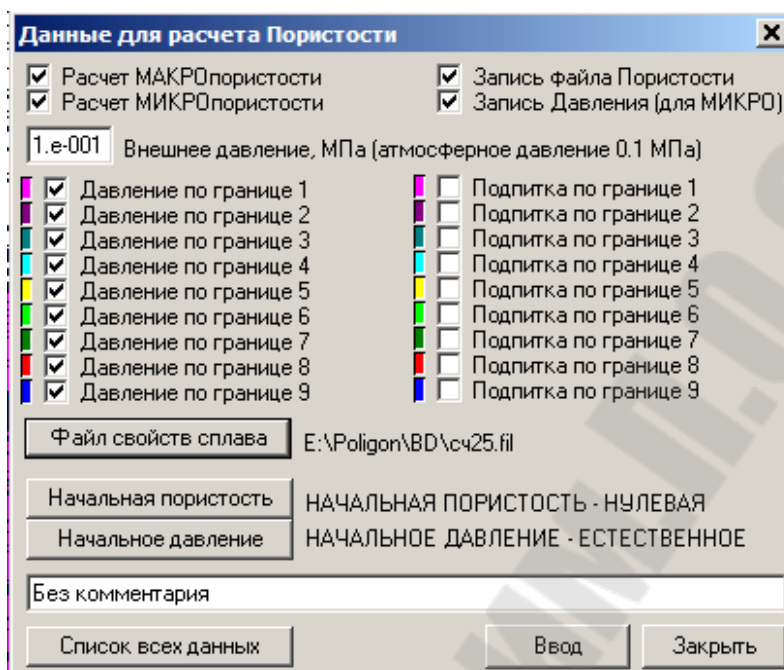


Рис. 17. Ввод данных для расчетов пористости

Правее расположены флажки **Запись файла Пористости** и **Запись Давления (для МИКРО)**, которые позволяют вам задать или отказаться от записи результатов расчета в виде отдельных файлов. Установим также оба флажка.

Ниже расположено поле ввода, в котором вы должны указать величину внешнего давления при формировании отливки в МПа. В нашем примере мы рассматриваем литье при атмосферном давлении, поэтому внесем в поле ввода значение 0,1.

Основное поле окна занимают флажки давления и подпитки по границам. Для удобства слева от каждого флажка расположен цветовой индикатор, соответствующий цвету индекса граней, заложенному вами при индексации границ в программе МАСТЕР. Чтобы восстановить в памяти картину назначения индексов граней можно воспользоваться кнопкой **Показать Индексы Границ Цветами** на Панели Режимов.

В нашем примере при выбранном способе литья можно считать, что атмосферное давление прикладывается по границе 8 «отливка – внешняя среда», обозначенной красным цветом, и по границе 9 «форма – внешняя среда», обозначенной синим цветом. Потому установим флажки в полях 8 и 9.

С помощью кнопки **Файл свойств сплава** через стандартное окно загружается файл с усадочно-фильтрационными свойствами сплава, имеющий расширение FIL. После выбора загружаемого файла его имя и полный путь будут написаны справа от кнопки. Файлы с усадочными свойствами создаются и редактируются в модуле **Сплав**. Для нашего примера воспользуйтесь заранее подготовленным файлом в базе данных ПОЛИГОНА: СЧ25.FIL.

В заключение работы с окном **Данные для расчета Пористости** вы должны подтвердить ввод исходных данных нажатием на кнопку **Ввод**.

Для просмотра результатов усадочного расчета в **Фурье** существуют свои шкала и палитра, которые вызываются кнопкой **Показать поля Пористости Панели Режимов**.

При использовании этих шкалы и палитры картинка модели перед началом расчета целиком окрашена в белый цвет – пористость отсутствует.

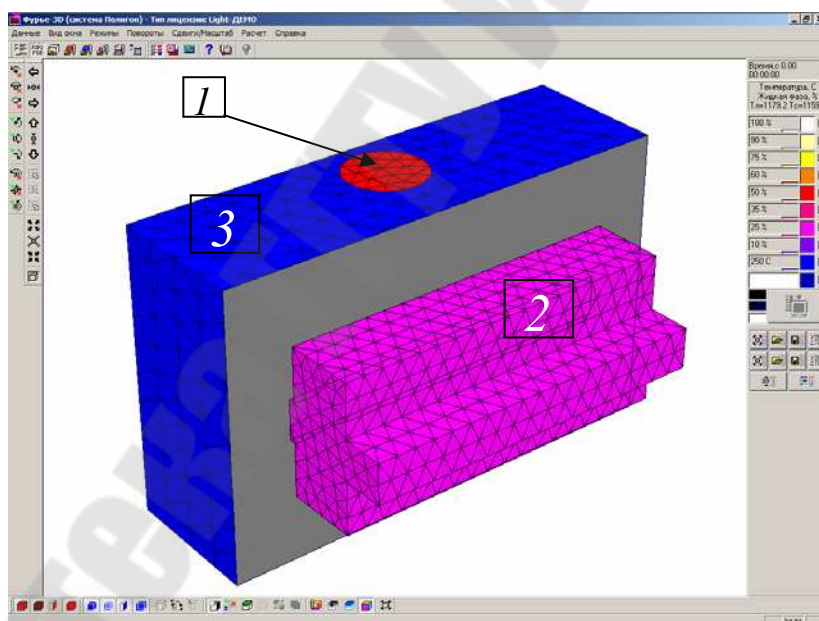


Рис. 18. Вид 3D-геометрии системы «отливка – форма».

Границы раздела: 1 – «окружающая среда – отливка»;
2 – «отливка – форма»; 3 – «форма – окружающая среда»

Теперь, когда все приготовления завершены можно переходить к собственно процедуре расчета.

Для запуска расчета следует воспользоваться выпадающим списком пункта меню **Расчет**.

Метод расчета. В подавляющем большинстве случаев рекомендуется применять итерационный метод, как более быстрый и менее ресурсоемкий.

Для непосредственного запуска расчета следует воспользоваться строкой **Начать расчет** из выпадающего списка пункта меню **Расчет**.

При этом программа загружает необходимую информацию и начинает производить вычисления. О том, что расчет выполняется, свидетельствует **Индикатор Расчета** – особая кнопка на **Панели Рабочих кнопок**.

При начале расчета пиктограмма на ней – лампочка – окрашивается в зеленый цвет, а сама кнопка индикатора нажимается и отжимается при переходе к каждому следующему шагу расчета. По окончании расчета лампочка гаснет. Кроме этого о прохождении расчета можно судить по счетчику времени, расположенному в верхней части **Панели Палитры и Шкалы**.

В процессе расчета в рабочем поле происходит последовательная визуализация каждого его шага. При этом отображающиеся на картинке параметры определяются тем, какая из кнопок управления показом на **Панели Режимов** нажата. Так, чтобы наблюдать за изменением тепловых и фазовых полей в процессе затвердевания, следует предварительно нажать на кнопку **Показать поля Температур**, а для визуализации пористости – кнопку **Показать поля Пористости**.

Однако наиболее полно возможности визуализации результатов расчета реализованы в специализированном модуле **ПОЛИГОНА Мираж**.

7. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И РАБОТА В МИРАЖЕ

После выполнения расчетов в модуле **Фурье** ваша работа должна быть продолжена в модуле **Мираж**. Главная задача этого модуля – визуализация результатов расчетов. Принципиально важно понимать, что файлы с результатами расчетов содержат поля значений тех или иных параметров во всех точках объекта моделирования в моменты процесса затвердевания, определяемые заданным шагом расчета. Процесс визуализации по сути сводится к последовательной пошаговой демонстрации этих полей в наглядной и выразительной форме. Интерфейс **Миража** позволяет наблюдать результаты визуально в виде

последовательно изменяющихся температурных и фазовых полей, а также полей с различной пористостью в каждый расчетный момент времени. Наглядность и выразительность представления достигаются за счет имеющегося в программе мощного аппарата работы с трехмерными геометрическими объектами, настраиваемой цветовой палитры и шкалы отображаемого параметра, а также механизма управления последовательностью и скоростью отображения шагов расчета.

Работа в **Мираже** осуществляется в несколько последовательных этапов:

1. Загрузка результатов расчетов.
2. Настройка параметров визуализации.
3. Визуализация результатов расчетов.

Мираж запускается нажатием на соответствующую кнопку в окне оболочки системы.

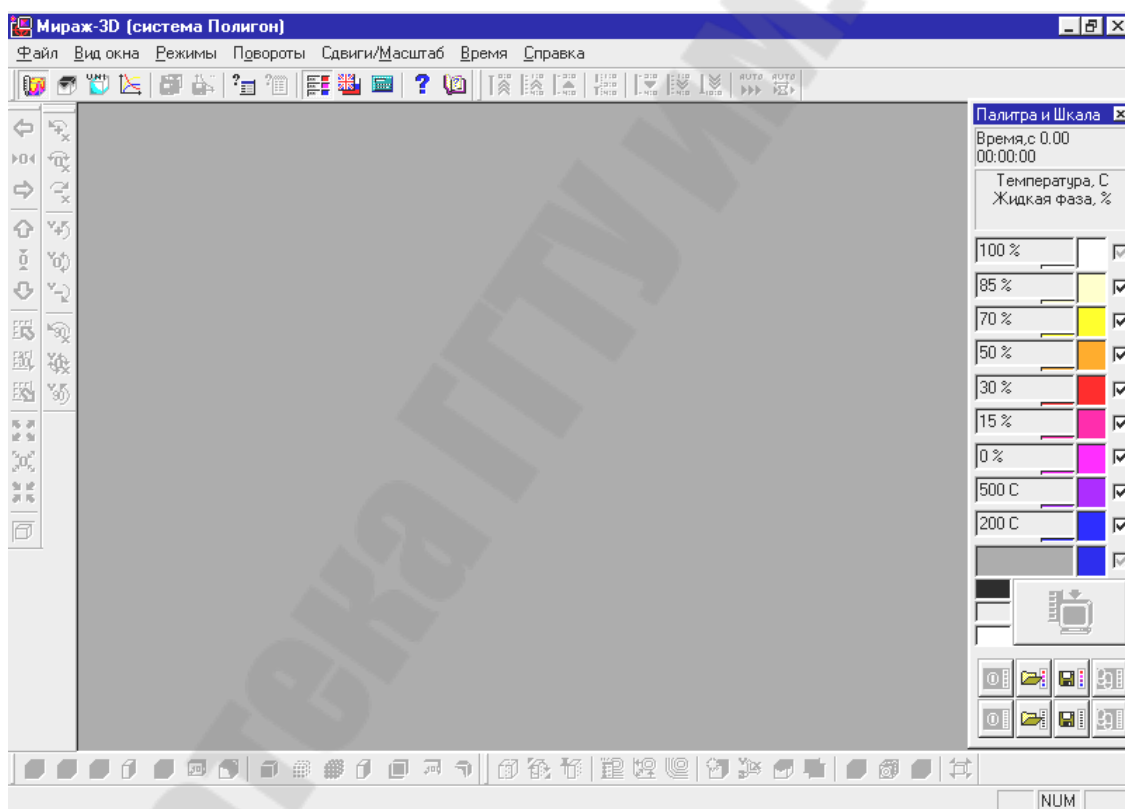


Рис. 19. Рабочее окно модуля Мираж-3D

Через несколько секунд будет открыто рабочее окно модуля.

Для того чтобы загрузить файл с результатами расчетов, следует воспользоваться кнопками, расположенными в левой верхней части окна на **Панели Рабочих кнопок**. Для решения нашей задачи нам потребуются две кнопки: кнопка **Загрузить файл Температур** и кнопка **Загрузить файл Пористости**.

После нажатия на любую из них на экране появится стандартное для Windows-приложений окно загрузки файла, в котором необходимо отыскать файлы результатов расчетов для нашего примера, созданные в Фурье: имя_файл.CST – для теплового расчета и имя_файла.P3D – для расчета пористости.

Загружаем сначала файл с результатами теплового расчета. В рабочем поле появится изображение температурно-фазовых полей модели в начальный момент времени, уже знакомое нам по Фурье (рис. 20).

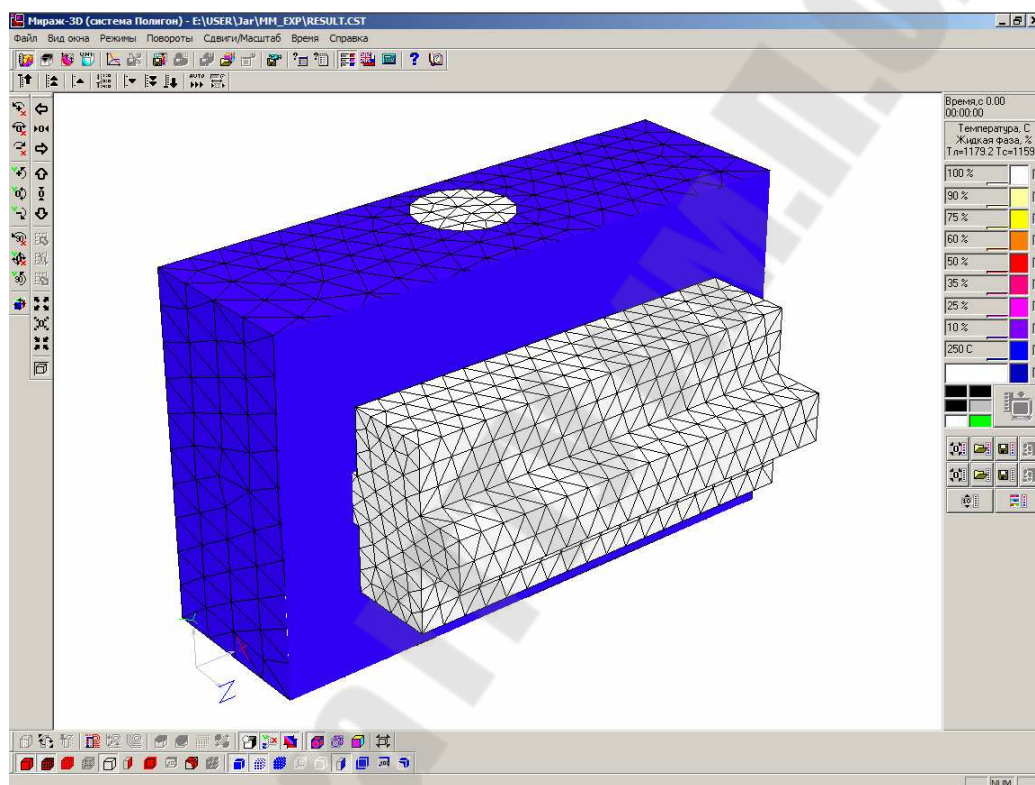


Рис. 20. Рабочее окно модуля Мираж-3D

При этом Панель Палитры и Шкалы автоматически настроится на демонстрацию температурно-фазовых полей.

Теперь мы можем приступить непосредственно к визуализации результатов расчета. Панель контроля Времени (рис. 21) предназначена для задания тем или иным способом момента времени расчета, визуализируемого в рабочем поле.



Рис. 21. Панель контроля Времени

Эта панель по умолчанию размещается по верхней границе рабочего поля в ее правой части. Если она отсутствует в окне программы, ее можно вызвать, используя пункт меню **Время**, в подменю которого имеется позиция **Панель контроля Времени**.

Шесть кнопок, объединенных в две похожих друг на друга группы, в чем-то сродни кнопкам перемотки на плеере. Нажимая на них, можно перейти к тому или иному времени расчета и получить соответствующую ему картинку в рабочем поле.

Расположенная между ними кнопка **Шкала Времени** позволяет перейти к любому шагу расчета, минуя демонстрацию промежуточных состояний. Нажатие на нее вызывает окно **Выбор времени**.

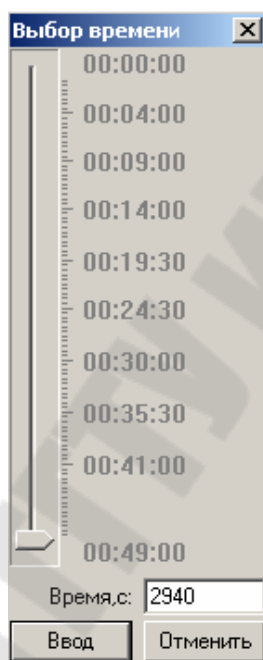


Рис. 22. Шкала времени обеспечивает возможность навигации по результатам расчета

Центральную часть окна занимает шкала времени с движком-регулятором, оцифрованная в соответствии с заложенными в расчет временными параметрами. При открытии окна движок находится в положении, отвечающем текущему моменту расчета. Для выбора необходимого момента времени следует установить движок в соответствующее положение. При этом в расположенном ниже окошечке **Время**, с будет индцировано точное значение установленного времени в секундах. Кстати с помощью этого окошечка также можно задать необходимый момент времени непосредственно в числовом виде. При этом движок-регулятор мгновенно отработает новое время расчета и займет соответствующее положение.

Нажатие на кнопку **Ввод** подтверждает принятие заданного момента времени и приводит к появлению соответствующей картинке в рабочем поле.

Кроме того, в **Мираже** имеется возможность динамического представления процесса с помощью кнопки **Автопросмотр Временных Шагов Вкл/Выкл**.

Нажатие на нее запускает (отжатие – приостанавливает) механизм последовательной смены изображений модели в рабочем поле. Стартовым моментом пошаговой визуализации является текущий момент времени в рабочем поле независимо от того, каким образом он был назначен.

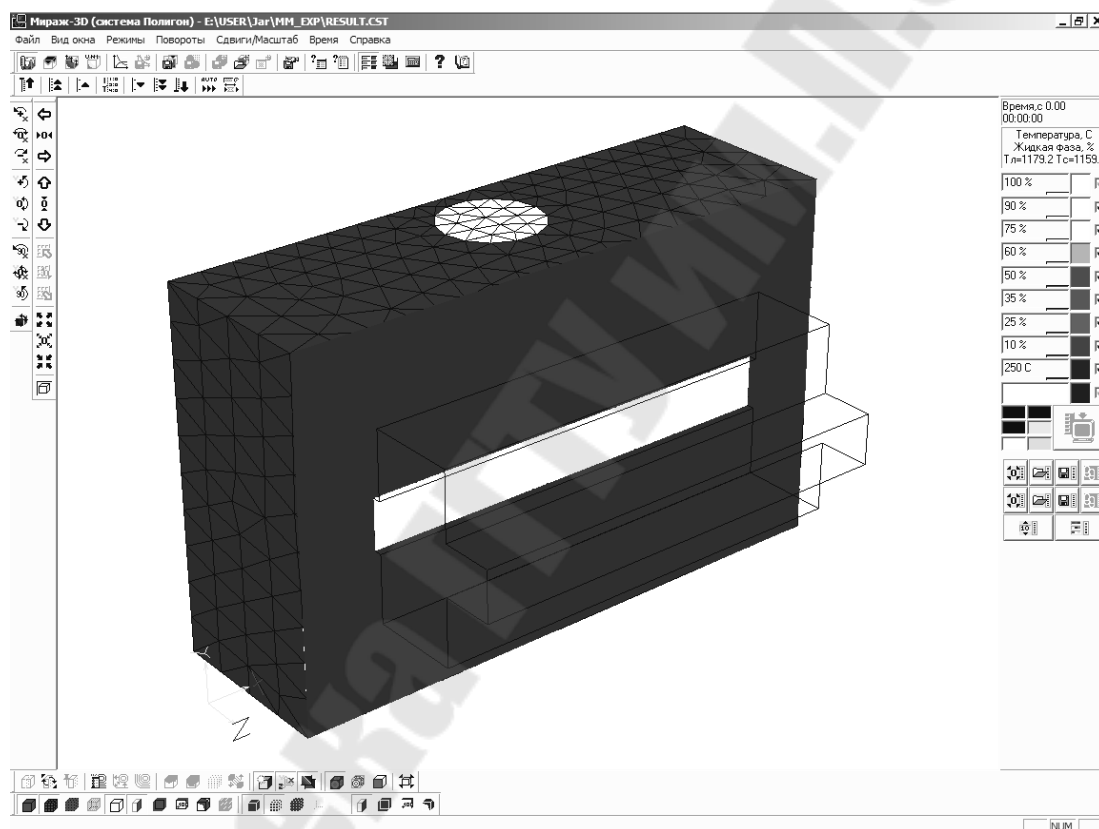


Рис. 23. Визуализация температур. Прошло времени – 0,01 с

Рассмотрим изменение температурно-фазовых полей в моделируемой нами отливке. Предварительно, для того чтобы увидеть процесс затвердевания внутри отливки, отбросим ее «выступающую» из формы часть с помощью кнопки **Сечение Отливки Вкл/Выкл** на **Панели Режимов**.

Теперь переместимся на 1 шаг расчета, нажав на кнопку **Следующий шаг** на **Панели контроля Времени**.

Картинка в рабочем поле претерпит некоторые изменения.

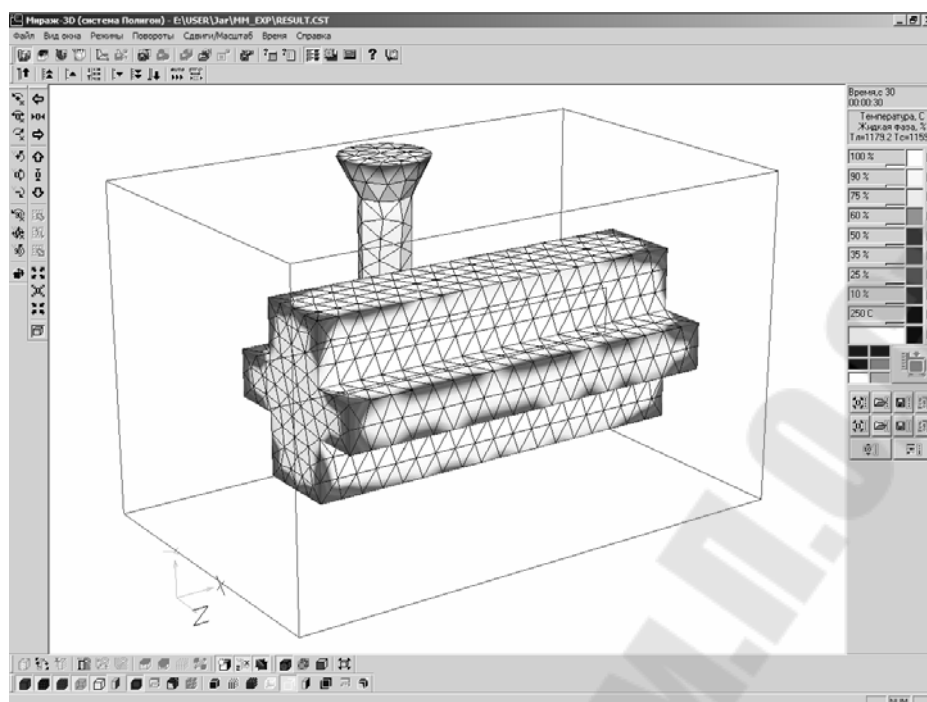


Рис. 24. Визуализация температур. Прошло времени – 30,00 с

Для продвижения сразу на 5 шагов расчета воспользуемся кнопкой 5 Шагов Вперед.

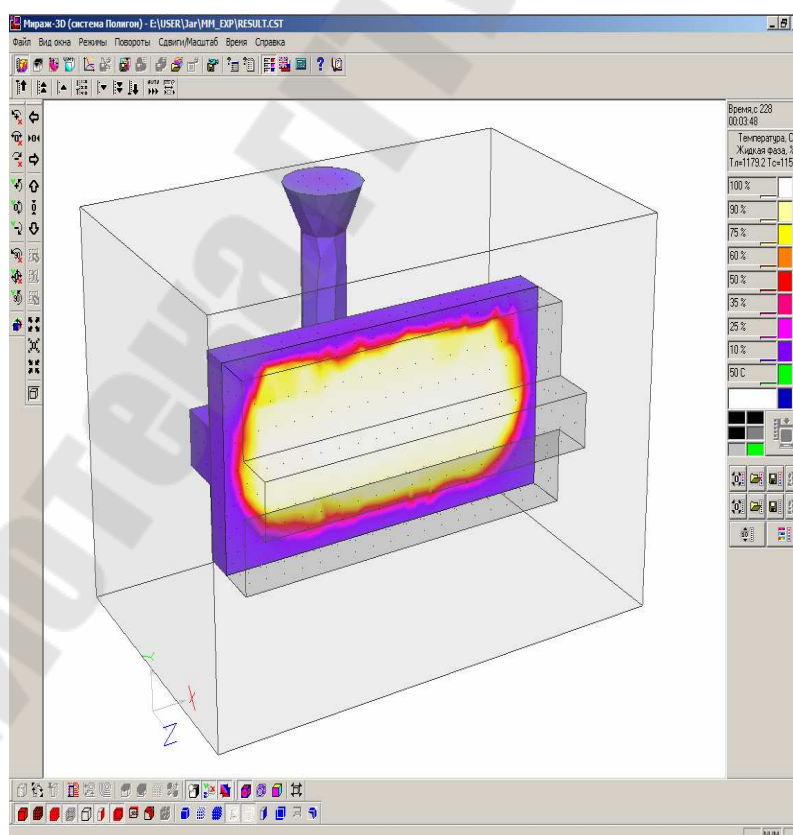


Рис. 25. Картина температур через 3 : 48 после конца заливки

Нажмем ее 10 раз, т. е. переместимся сразу на 50 шагов расчета. В верхней части Панели Палитры и Шкалы можно увидеть, какому моменту времени соответствует текущее состояние картинki.

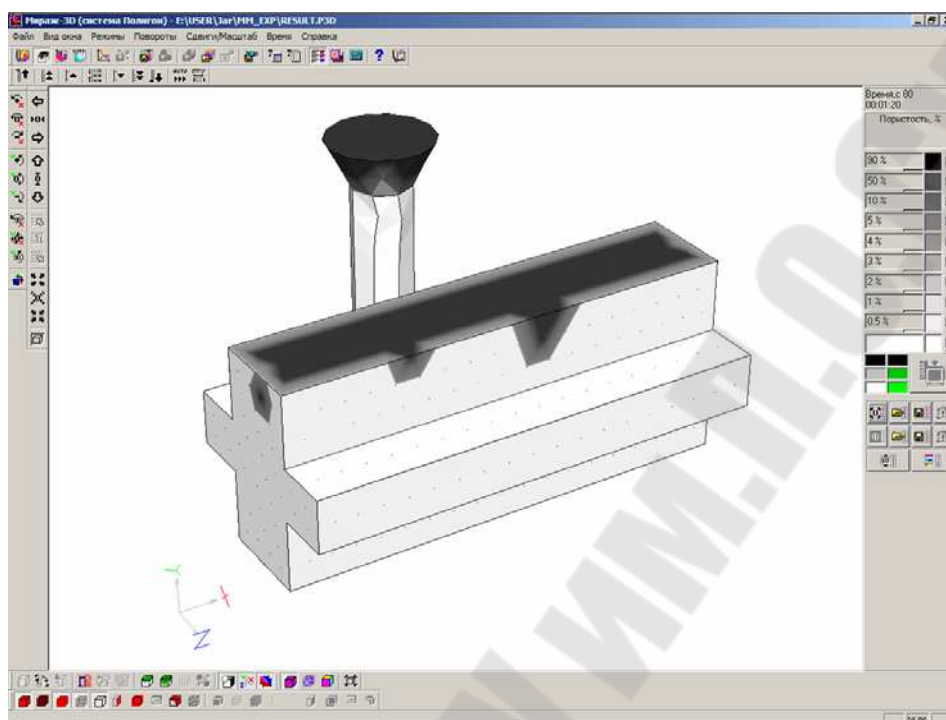


Рис. 26. Распределение пористости через 3 : 48 после конца заливки

В случае анализа пористости нас интересует в основном итоговый результат, поэтому мы можем перейти непосредственно к последнему шагу расчета, когда отливка уже полностью затвердела. Для этого воспользуемся кнопкой **Конечный шаг** на Панели контроля **Времени**

Как видно (рис. 26), в отливке произошло возникновение серьезных усадочных дефектов в зоне отливки (слитка). Для получения качественной отливки в данном случае необходимо серьезное изменение технологии литья. Например, установка прибыли над зоной усадочного дефекта в отливке.

Для того чтобы увидеть раковину целиком и более объемно, воспользуемся еще одной функцией **Миража** – построением **изоповерхностей**, – которая активизируется нажатием на кнопку **Изоповерхность для Отливки** на Панели **Режимов**.

В открывшемся окне **Параметры Изоповерхности (отливка)** в разделе **Значение Изоповерхности** включим радиокнопку **50%**, а в правой части окна – радиокнопку **Показать Изоповерхность и Ниже**, а затем нажмем на кнопку **Ввод** (рис. 27).

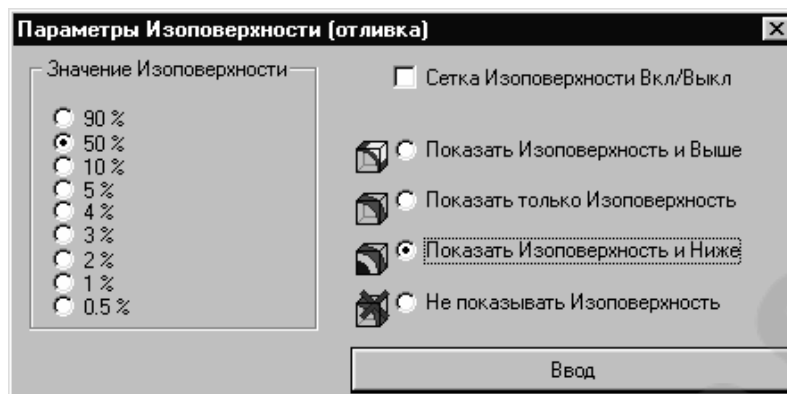


Рис. 27. Параметры Исоповерхности (отливка)

В результате мы получим картинку, на которой отчетливо будет видна форма образовавшейся при затвердевании раковины (рис. 28).

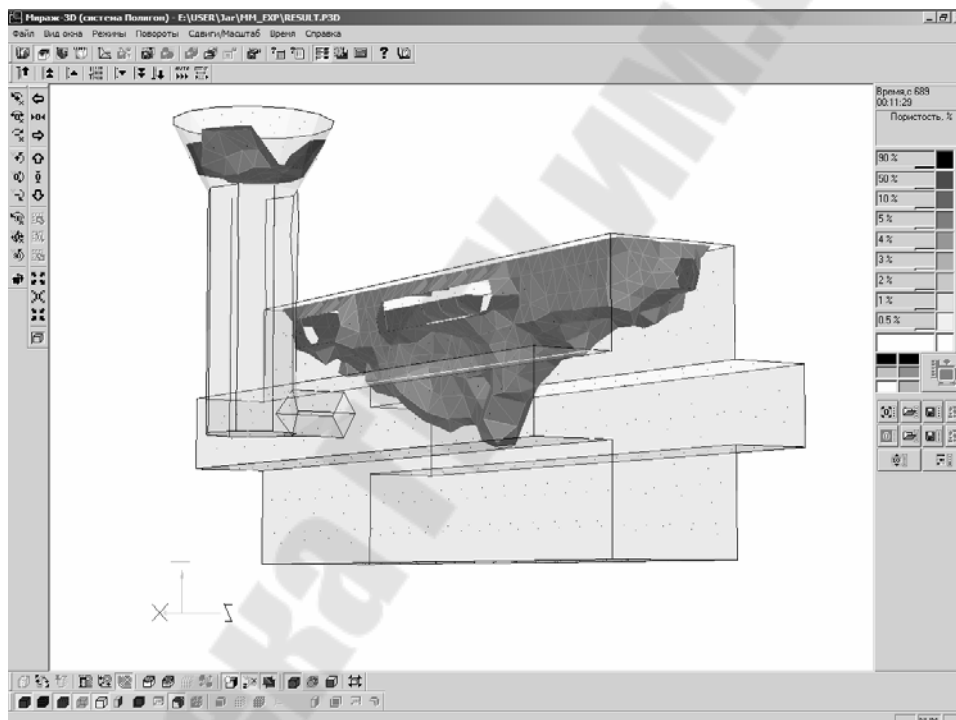


Рис. 28. Поверхность фронта пористости в отливке после окончания процесса охлаждения

Очевидно, что технология, приводящая к получению отливки с таким дефектом в рабочей зоне, не может быть признана годной и нуждается в корректировке.

Таким образом, по результатам обработки данных проведения численного моделирования с использованием программы Полигон можно провести анализ возникновения ряда технологических дефектов литья, проанализировать недостатки базовой технологии производства и внести коррективы, позволяющие устранить возникающий брак.

8. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА И ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ ПО КУРСОВОМУ ПРОЕКТУ

1. Задание на курсовое проектирование (выдается преподавателем).
2. Чертеж отливки, с указанием поверхности, через которую проводится заливка металла.

3. Введение.

4. Теоретическая часть.

Описание возможностей современных программных продуктов, моделирующих технологические процессы формирования отливки.

Описание сущности метода конечных элементов и метода конечных разностей. Их достоинства и недостатки.

Алгоритм аналитического расчета процесса затвердевания отливки для геометрии простой конфигурации (желательно приближенной к контурам отливки, выданной в задании).

Описание математических основ моделирования затвердевания отливок в пакете ПОЛИГОН.

Описание физических свойств применяемого материала формы и отливки.

5. Практическая часть.

Изометрическая проекция формы с отливкой.

Конечно-элементное представление модели (изометрическое и в 2-х проекциях).

Вид модели в программе ПОЛИГОН.

Пять изображений процесса затвердевания отливки в различные моменты протекания процесса затвердевания отливки.

Картина пористости в отливке в середине процесса затвердевания.

Картина пористости в отливке по окончании процесса затвердевания.

Три изображения полей давлений в отливке в различные моменты протекания процесса затвердевания отливки.

6. Выводы.

7. Список использованной литературы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Элиот, Р. Управление эвтектическим затвердеванием / Р. Элиот. – Москва : Металлургия, 1987. – 352 с.
2. Голод, В. М. Теория литейной формы. Механика и теплофизика / В. М. Голод, О. А. Корнюшкин. – Санкт-Петербург : Изд-во СПб ГТУ, 2001. – 108 с.
3. Валисовский, И. В. Пригар на отливках / И. В. Валисовский. – Москва : Машиностроение, 1983. – 192 с.
4. Дубов, Н. Ф. Разливка стали / Н. Ф. Дубов, И. М. Власов, В. В. Король. – Москва : Металлургия, 1975. – 200 с.
5. Справочник по чугунному литью / под. ред. д-ра техн. наук Н. Г. Гиршовича. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Машиностроение. Ленинград. отделение, 1978. – 758 с.
6. Боровиков, В. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов / В. Боровиков. – 2-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 688 с. : ил.
7. Литье по выплавляемым моделям / под общ. ред. Я. И. Шклянника и В. А. Озерова. – Москва : Машиностроение, 1971. – 198 с.
8. Сегерленд, Л. Применение метода конечных элементов. – Москва : Мир, 1979. – 392 с.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

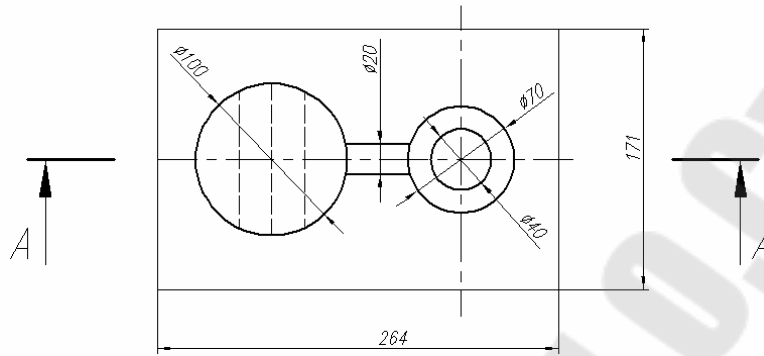
Номер варианта	Номер типа геометрии отливки	Коэффициент масштабирования исходной геометрической модели (N)	Тип используемого материала для получения литой заготовки	Начальная температура заливки	Тип литья
1	3	1,50	СЧ-25	+100 T (лик)	в кокиль
2	1	1,75	АЛ-9	+55 T (лик)	в песчано-глинистую форму
3	6	2,00	Сталь 35ХМЛ	+110 T (лик)	в оболочковую форму
4	9	3,00	Сталь 30 ХНМЛ	+60 T (лик)	в керамическую форму
5	2	0,75	Сталь 10Х18Н9Т	+125 T (лик)	в кокиль
6	6	0,50	Сталь 35Л	+130 T (лик)	в песчано-глинистую форму
7	9	1,00	СЧ-20	+75 T (лик)	в оболочковую форму
8	3	1,10	СЧ-25	+55 T (лик)	в керамическую форму
9	6	1,15	АЛ-9	+105 T (лик)	в кокиль
10	7	1,50	Сталь 35ХМЛ	+85 T (лик)	в песчано-глинистую форму
11	2	1,75	Сталь 30 ХНМЛ	+140 T (лик)	в оболочковую форму
12	10	2,00	Сталь 10Х18Н9Т	+90 T (лик)	в керамическую форму
13	1	3,00	Сталь 35Л	+105 T (лик)	в кокиль
14	9	0,75	СЧ-20	+130 T (лик)	в песчано-глинистую форму
15	7	0,50	СЧ-25	+45 T (лик)	в оболочковую форму
16	5	1,00	АЛ-9	+95 T (лик)	в керамическую форму
17	8	1,10	Сталь 35ХМЛ	+100 T (лик)	в кокиль

Номер варианта	Номер типа геометрии отливки	Коэффициент масштабирования исходной геометрической модели (N)	Тип используемого материала для получения литой заготовки	Начальная температура заливки	Тип литья
18	2	1,15	Сталь 30 ХНМЛ	+55 T (лик)	в песчано-глинистую форму
19	5	1,50	Сталь 10Х18Н9Т	+130 T (лик)	в оболочковую форму
20	3	1,75	Сталь 35Л	+75 T (лик)	в керамическую форму
21	4	2,00	СЧ-20	+55 T (лик)	в кокиль
22	7	3,00	СЧ-25	+105 T (лик)	в песчано-глинистую форму
23	8	0,75	АЛ-9	+85 T (лик)	в оболочковую форму
24	5	0,50	Сталь 35ХМЛ	+140 T (лик)	в керамическую форму
25	1	1,00	Сталь 30 ХНМЛ	+90 T (лик)	в кокиль
26	4	1,10	Сталь 10Х18Н9Т	+105 T (лик)	в песчано-глинистую форму
27	10	1,15	Сталь 35Л	+130 T (лик)	в оболочковую форму
28	8	1,50	СЧ-20	+130 T (лик)	в керамическую форму
29	5	1,75	СЧ-25	+75 T (лик)	в кокиль
30**	4	2,00	АЛ-9	+ 55 T (лик)	в песчано-глинистую форму
0*	11	1,00	СЧ-25	+105 T (лик)	в кокиль

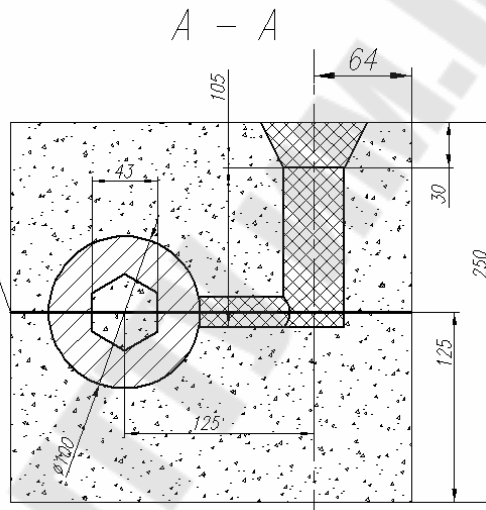
*Вариант задания приведен для реализации примера выполнения задания.




**При необходимости получения заданий с номером 31 и выше, например 41, берем задание по номеру варианта 11, т. е. задание варианта 50 равно заданию варианта 20, с коэффициентом масштаба $N + 1$. Например, в варианте 20 коэффициент масштаба равен 1,75. Соответственно в варианте 50 масштаб исходной модели равен $1,75 + 1 = 2,75$ и т. д.

КР 200_ ВАР 01()



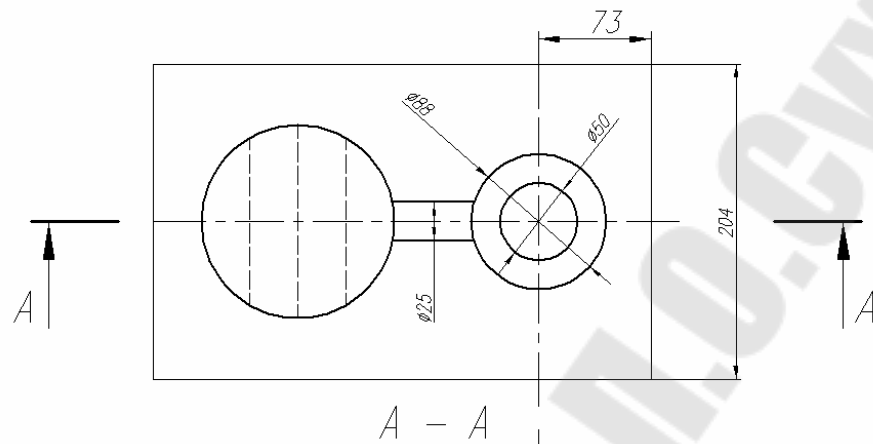
Линия разъема



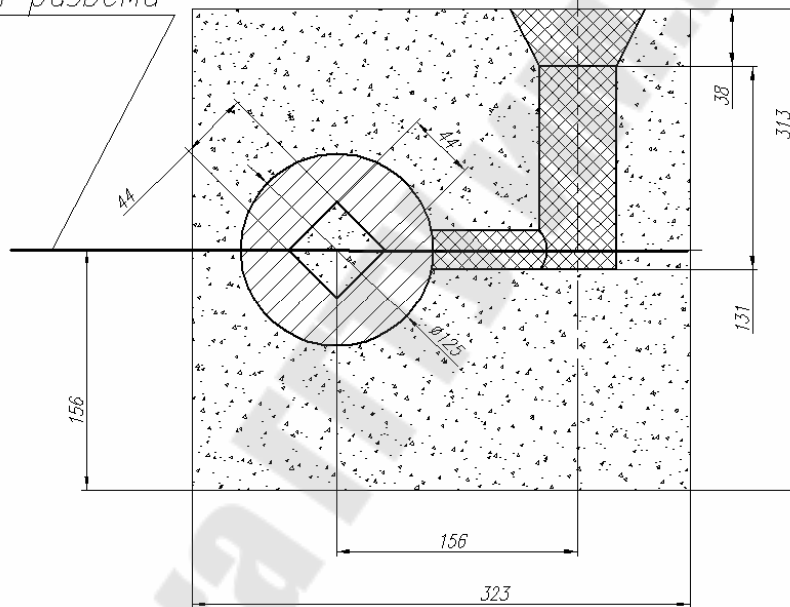
-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.




				КР 200_ ВАР 01()	
				Задание по курсовому проекту	
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Оценка по проекту
	Выдал	Жаранов В.А.			ПОДПИСЬ
				по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"	
				ЛИСТ	ЛИСТОВ 1
				ГГТУ им. П.О. Сухого	
УТВ.	Ровин				

КР 200_ ВАР 02()

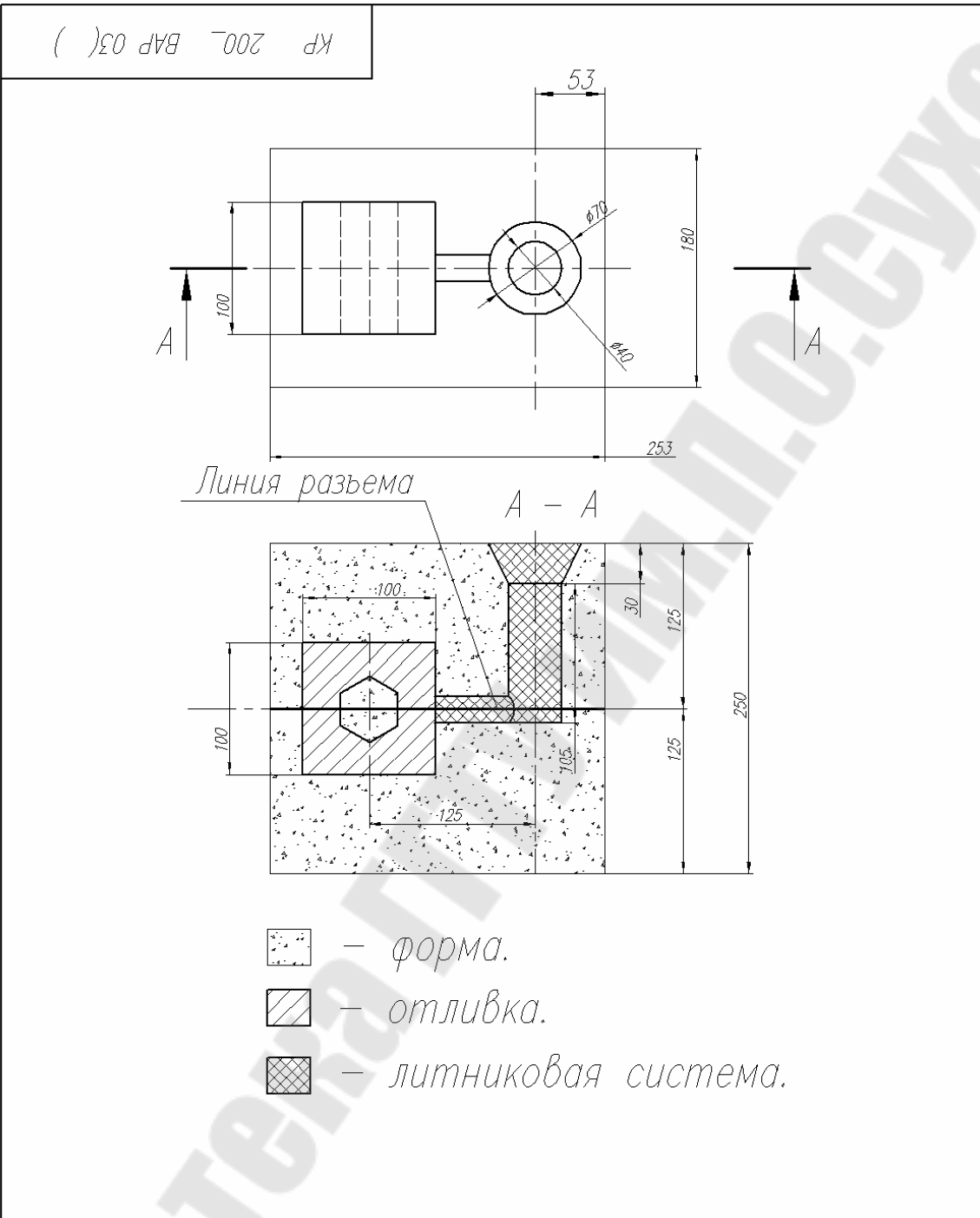


Линия разреза



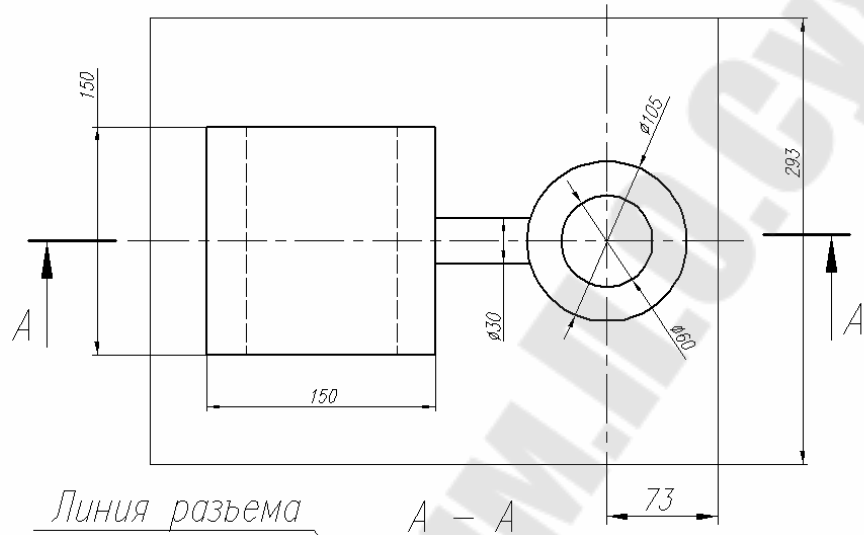
-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

				КР 200_ ВАР 02()	
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"
	Выдал	Жаранов В.А.			
	Получил				Оценка по проекту
					ПОДПИСЬ
					ЛИСТ
					ЛИСТОВ 1
УТВ.	Ровин				ГГТУ им. П.О. Сухого



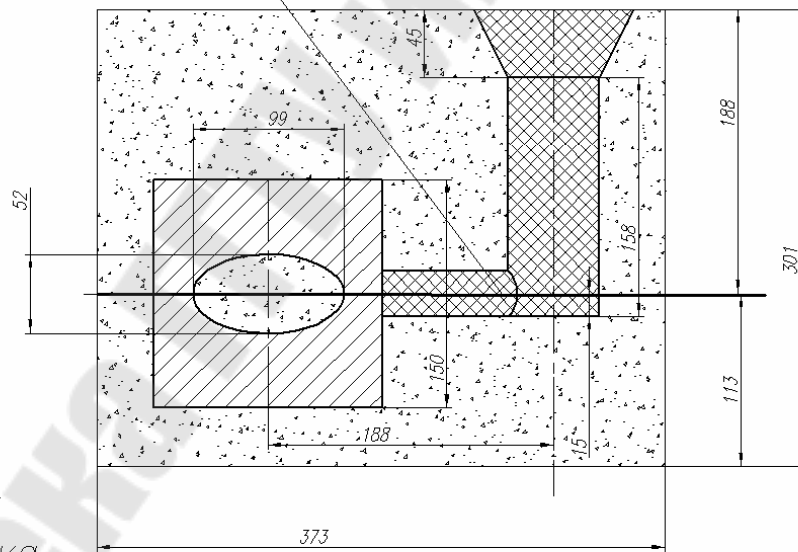
КР 200_ ВАР 03()						
					Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"	Оценка по проекту _____ ПОДПИСЬ
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА		ЛИСТ
						ЛИСТОВ 1
Выдал		Жаранов В.А.				
Получил						
утв.		Ровин				ГТУ им. П.О. Сухого




КР 200_ ВАР 04()



Линия разреза

A - A

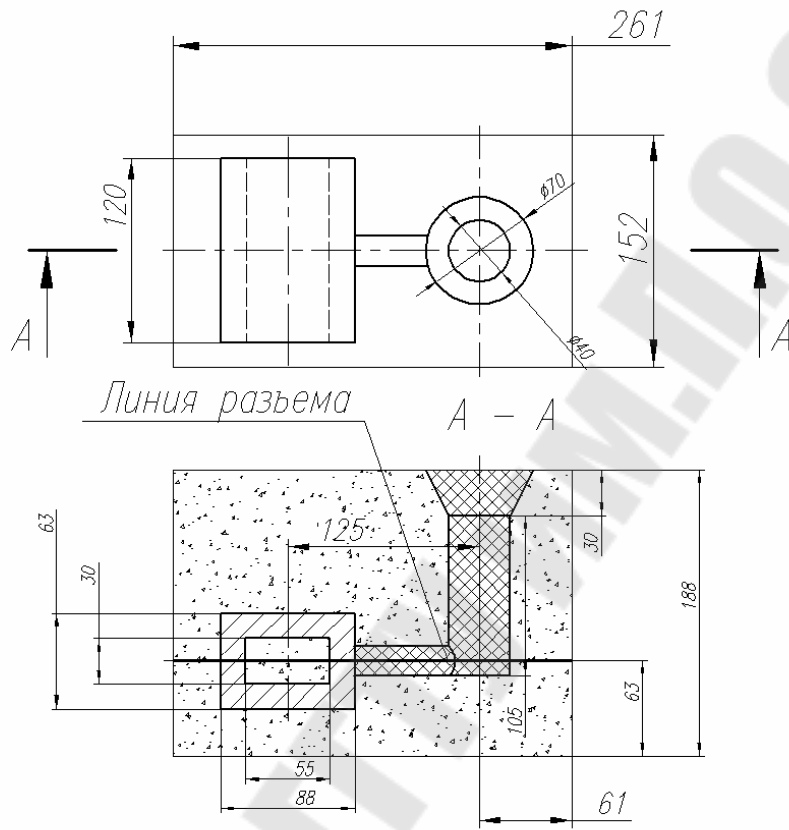


-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

КР 200_ ВАР 04()

ИЗМ.	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"		Оценка по проекту	
							ПОДПИСЬ	
Выдал		Жаранов В.А.					ЛИСТ	ЛИСТОВ
Получил								
УТВ.		Ровин			ГГТУ им. П.О. Сухого			

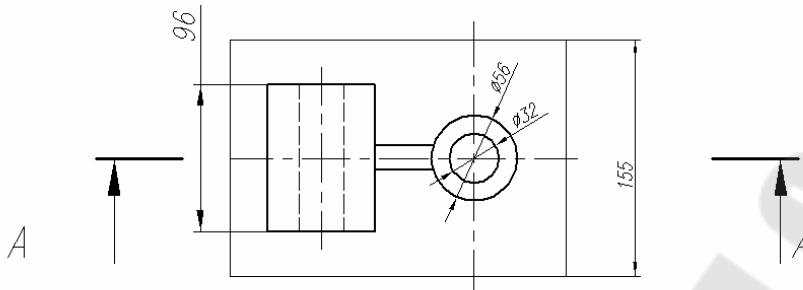
КР 200_ ВАР 05()



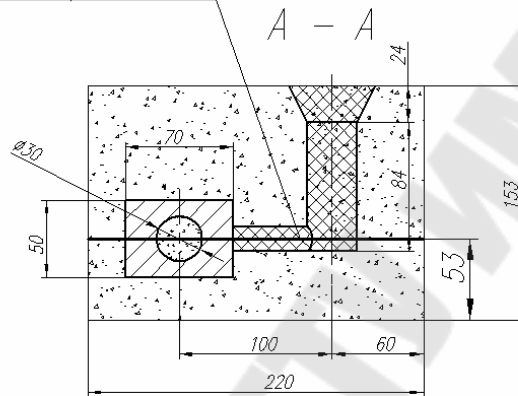
-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.




				КР 200_ ВАР 05()	
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"
	Выдал	Жаранов В.А.			
	Получил				Оценка по проекту
					ПОДПИСЬ
					ЛИСТ
					ЛИСТОВ 1
	УТВ.	Ровин			ГГТУ им. П.О. Сухого

КР 200_ ВАР 06()

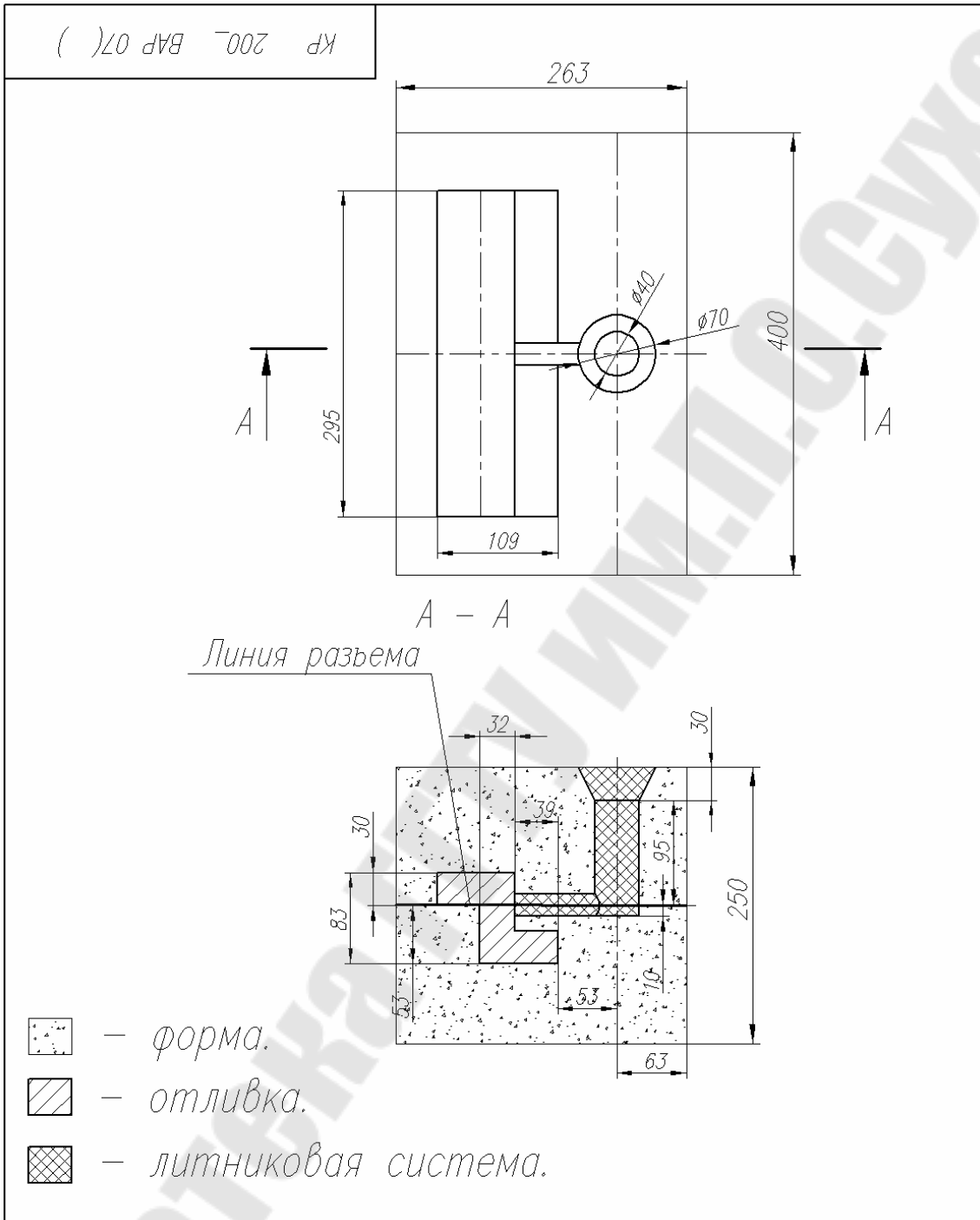


Линия разъема



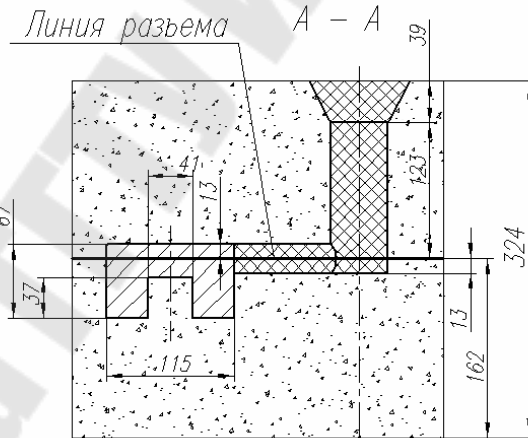
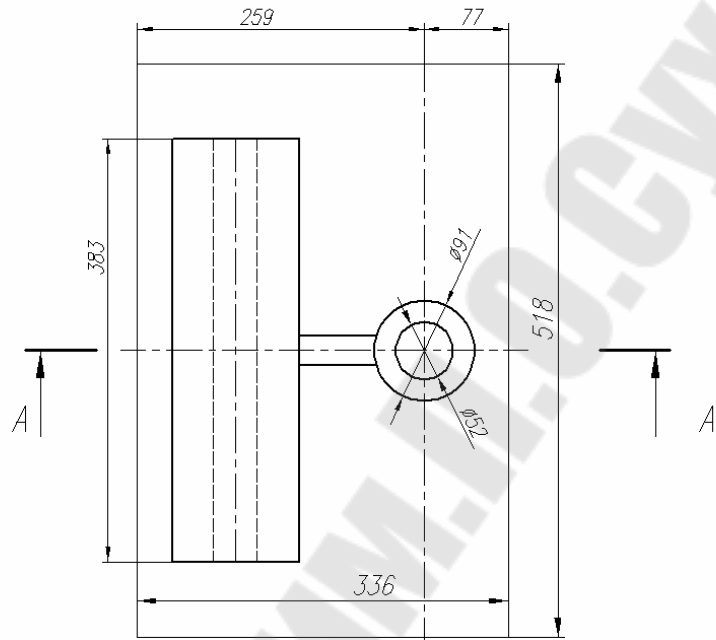
-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

					КР 200_ ВАР 06()	
					Задание по курсовому проекту	
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Оценка по проекту	
Выдал		Жаранов В.А.			ПОДПИСЬ	
Получил					ЛИСТ	ЛИСТОВ 1
утв.		Ровин			ГТУ им. П.О. Сухого	



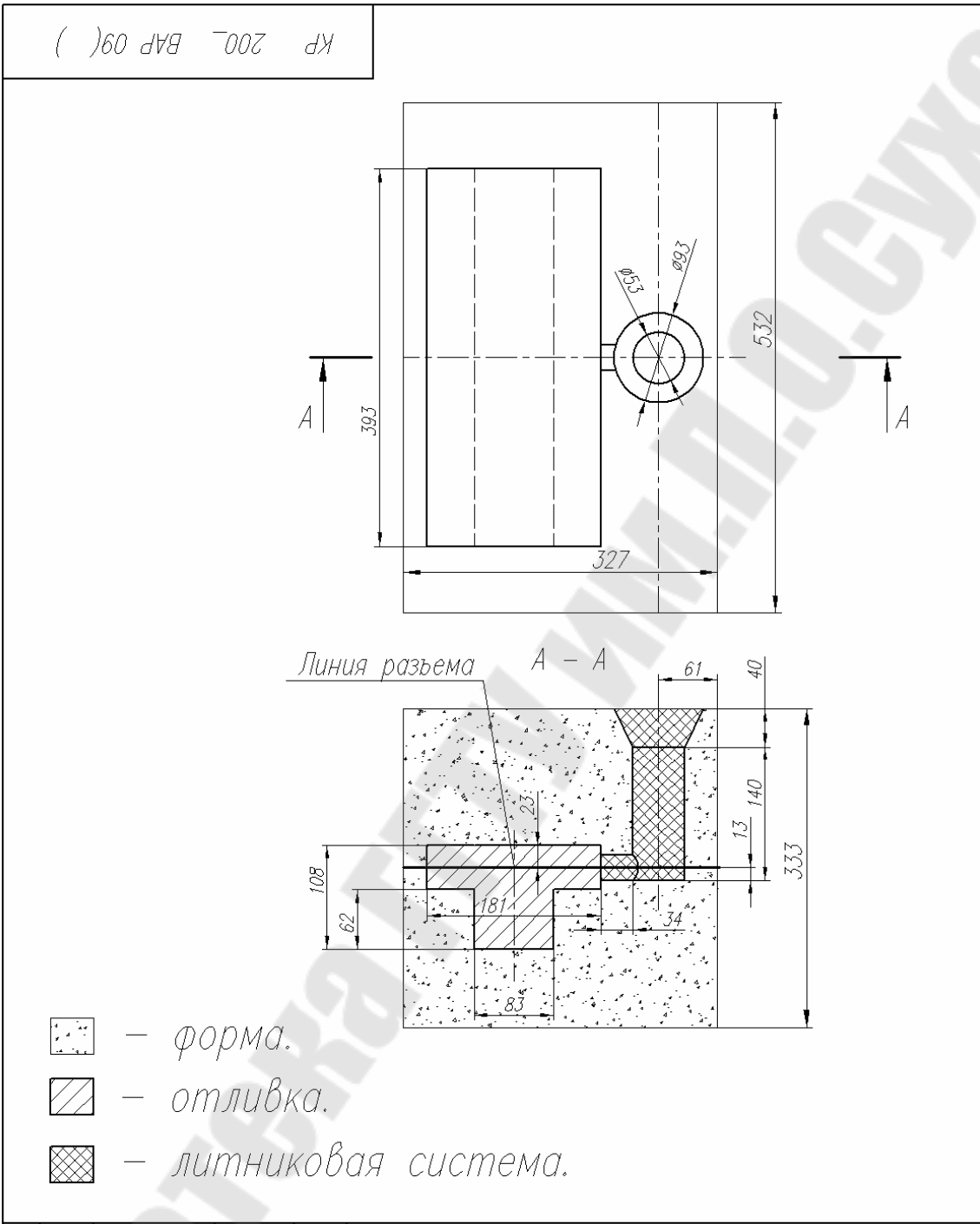
				КР 200_ ВАР 07()	
				Задание по курсовому проекту	Оценка по проекту
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	ПОДПИСЬ
Выдал		Жаранов В.А.			ЛИСТ ЛИСТОВ 1
Получил					
утв.		Ровин			ГТУ им. П.О. Сухого

КР 200_ ВАР 08()



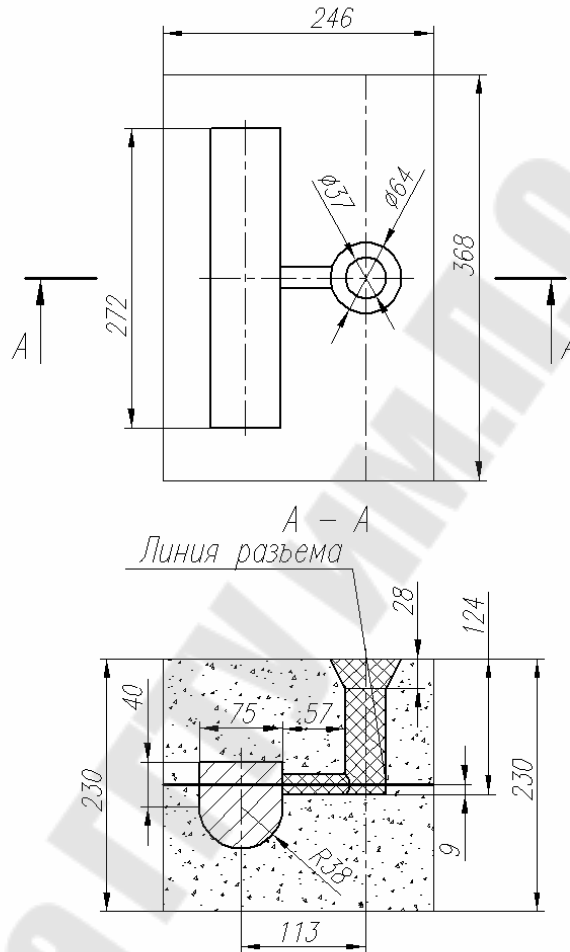
-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

				КР 200_ ВАР 08()		
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"	
Выдал		Жаранов В.А.				
Получил					Оценка по проекту	
					ПОДПИСЬ	
					ЛИСТ	
					ЛИСТОВ 1	
утв.		Ровин			ГТУ им. П.О. Сухого	






				КР 200_ ВАР 09()			
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА	Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"	Оценка по проекту	
Выдал	Жаранов В.А.					ПОДПИСЬ	
Получил						ЛИСТ	ЛИСТОВ 1
УТВ.	Ровин					ГТУ им. П.О. Сухого	

КР 200_ ВАР 10()

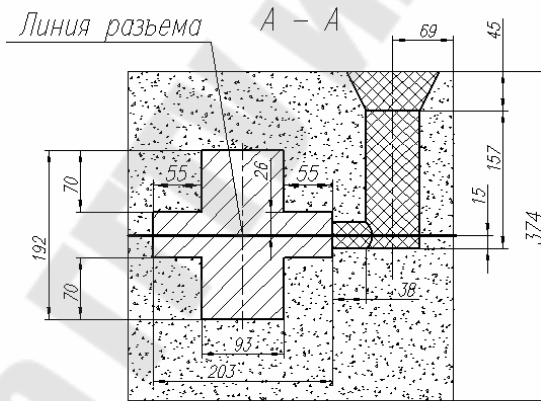
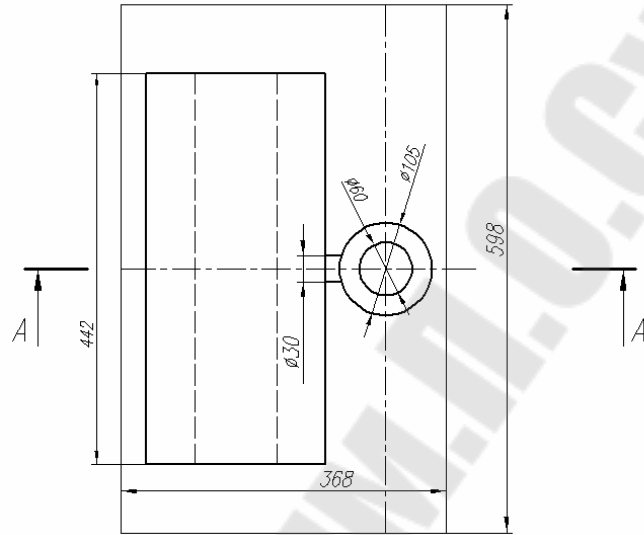




A - A
Линия разъема

-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

КР 200_ ВАР 10()				
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА
	Выдал	Жаранов В.А.		
	Получил			
	УТВ.	Ровин		
Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"			Оценка по проекту	
			ПОДПИСЬ	
			ЛИСТ	ЛИСТОВ 1
			ГГТУ им. П.О. Сухого	

КР 200_ ВАР 11()



-  — форма.
-  — отливка.
-  — литниковая система.

КР 200_ ВАР 11()				
ИЗМ	ЛИСТ	№ ДОКУМ.	ПОДПИСЬ	ДАТА
	Выдал	Жаранов В.А.		
	Получил			
	УТВ.	Ровин		
Задание по курсовому проекту по курсу "Математическое моделирование технологических процессов"			Оценка по проекту ПОДПИСЬ	
			ЛИСТ	ЛИСТОВ 1
			ГГТУ им. П.О. Сухого	

СОДЕРЖАНИЕ

1. Задачи курсового проекта	3
2. Этапы проектирования	3
3. Математическое моделирование и литейные технологии.....	5
4. Система моделирования литейных процессов ПОЛИГОН.....	8
5. Интерактивный конечно-элементный пре- и постпроцессор Altair Hypermesh.....	10
6. Пример выполнения курсового проекта	11
7. Визуализация результатов расчета и работа в МИРАЖЕ	28
8. Содержание курсового проекта и пояснительной записки по курсовому проекту	36
Литература.....	37
Приложение	38

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

**Методические указания
к курсовому проекту
для студентов специальности 1-36 02 01
«Машины и технология литейного производства»
дневной и заочной форм обучения**

Авторы-составители: **Ткаченко** Александр Владимирович
Жаранов Виталий Александрович

Редактор
Компьютерная верстка

Н. Г. Мансурова
Н. В. Широглазова

Подписано в печать 30.12.06.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Цифровая печать. Усл. печ. л. 3,02. Уч. - изд. л. 3,2.
Изд. № 214.
E-mail: ic@gstu.gomel.by
<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:
Издательский центр
Учреждения образования «Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого».
ЛИ № 02330/0133207 от 30.04.2004 г.
246746, г. Гомель, пр. Октября, 48, т. 47-71-64.