

Прототип интегрированной программной платформы для сопровождения вычислительного эксперимента в комплексных задачах математического моделирования¹

М.П. Галанин <Galan@keldysh.ru>

М.М. Горбунов-Посадов <Gorbunov@keldysh.ru>

А.В. Ермаков <Ermakov@keldysh.ru>

В.В. Лукин <VVLukin@gmail.com>

А.С. Родин <rals@bk.ru>

К.Л. Шаповалов <ShapovalovKL@yandex.ru>

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4

Аннотация. Представлена архитектура, интерфейсы и форматы входных и выходных данных платформы, реализованные пилотные версии инструментальных и проблемно-ориентированных модулей программной платформы Теметос для сопровождения вычислительного эксперимента. Платформа Теметос предназначена для полномасштабного математического моделирования в различных прикладных и фундаментальных областях. Она предоставляет возможности подготовки геометрической и физической моделей исследуемой конструкции или физического процесса к расчету, инструменты настройки внешних или встроенных проблемно-ориентированных модулей, позволяет осуществлять запуск, контроль прохождения и анализ результатов расчетов.

Ключевые слова: математическое моделирование; вычислительный эксперимент; программная архитектура; интегрированная программная платформа; неоднородные среды.

1. Введение

Для решения широкого класса инженерных и прикладных научных задач становятся все более востребованными физически, математически и

¹ Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 12-01-31193, 12-01-00109, 12-02-00687), а также гранта по поддержке ведущих научных школ НШ-1434.2012.2. Авторы выражают благодарность А.В. Плеханову, М.А. Семериковой, П.В. Тюфягину за сотрудничество в выполнении данной работы.

вычислительно сложные модели, требующие применения высокоточных методов [1]. Подобные методы ведут к большому объёму вычислительной работы, поэтому математическое моделирование в научно-технических приложениях требует высокой эффективности разрабатываемых алгоритмов, включая распараллеливание вычислений.

С другой стороны, многие этапы построения, программной реализации и исследования математической модели (задание геометрии области, построение сеток, ввод начальных и граничных данных модели, запуск и отслеживание работы параллельной версии расчетных процедур, визуализация и анализ полученного решения) являются общими для задач из различных областей теории и практики. Важным в такой ситуации становится создание интегрированной программной платформы, позволяющей задействовать высокоэффективные (в том числе параллельные) численные алгоритмы для решения задач различной размерности, содержащих уравнения разных типов и разного физического содержания (в рамках связанных задач).

Существует большое количество вычислительных программных платформ, позволяющих решать стандартные задачи математической физики в различных областях инженерной и прикладной научной практики. Большая часть из них является коммерческой (такие как ANSYS [2], Nastran, Abaqus, Fluent и ряд других), имеет продвинутый пользовательский интерфейс, включает пре- и постпроцессор, а также множество закрытых проблемно-ориентированных *модулей-решателей* для моделирования термомеханических, газовых и других процессов с применением метода конечных элементов (МКЭ) и (реже) метода конечных разностей (МКР). Обычно подобные системы создаются как универсальные, применимые для широкого круга практически важных областей. Универсальность подобных программных платформ приводит к большим трудностям при попытках решения в рамках таких пакетов физически и математически сложных задач в областях, включающих разного рода неоднородности физических параметров или геометрических характеристик. При этом, как правило, квалифицированный пользователь не имеет возможности эффективным образом включать в состав подобного программного комплекса собственные проблемно-ориентированные программные модули, поскольку многие из интерфейсов обработки геометрии области и исходных данных являются также закрытыми.

В последнее время активно развиваются открытые программные платформы для проведения инженерных и, реже, научных расчетов (например, OpenFOAM [3], Salome, Code-Aster, Code Athena), создаваемые сообществами программистов из разных стран, зачастую не объединенных в коммерческие корпорации. Подобные программные пакеты изначально строятся на открытых интерфейсах обработки данных, обеспечивая универсальность применения пакета и позволяя группам разработчиков расширять возможности платформы за счет включения собственных МКЭ или МКР

расчетных кодов. В то же время в рамках подобных платформ реализованы, как правило, наиболее стандартные подходы к решению задач математической физики без учета особенностей конкретных постановок практически значимых задач. Среди таких особенностей – необходимость применения методов повышенного порядка аппроксимации, контроль консервативности расчетной схемы и др., т.е. все то, что чаще всего отличает авторские прикладные программные комплексы, разрабатываемые под специальные задачи. Кроме того, задание геометрии области, начальных и краевых данных в подобных платформах часто необходимо осуществлять без использования графической оболочки путем правки текстовых конфигурационных файлов, что существенно усложняет вспомогательные технические вопросы математического моделирования.

В данной статье представлены результаты разработки прототипа интегрированной программной платформы для сопровождения вычислительного эксперимента в комплексных задачах математического моделирования – кроссплатформенной графической инструментальной среды Теметос. Платформа предназначена для построения и исследования математических моделей объектов и процессов, включая моделирование электромагнитных, тепловых, упругих и газодинамических полей в областях, содержащих геометрически сложные подобласти с резко неоднородными свойствами. Основная цель разработки платформы заключается в создании программного окружения, позволяющего с помощью ряда открытых интерфейсов передачи данных и управления расчетом оснастить авторский проблемно-ориентированный модуль-решатель инструментами подготовки, проведения и анализа результатов вычислительного эксперимента. В качестве базовых решателей для платформы адаптированы следующие два модуля.

1. Параллельный программный комплекс для решения двумерных задач идеальной магнитной гидродинамики разрывным методом Галеркина (RKDG-метод) [4]. Модуль используется для моделирования процессов развития магнито-ротационной неустойчивости в околосветной плазме.
2. Термомеханический решатель [5], позволяющий, в частности, исследовать прочность конструкций в рамках связанной термоупругопластической задачи с разрушением [6]. Модуль используется для численного исследования работы магнитного компрессора, а также моделирования элементов конструкций, испытывающих высокие тепловые нагрузки.

2. Общая архитектура платформы Теметос

Блок-схема платформы сопровождения вычислительного эксперимента состоит из групп процедур, представленных на рис. 1.

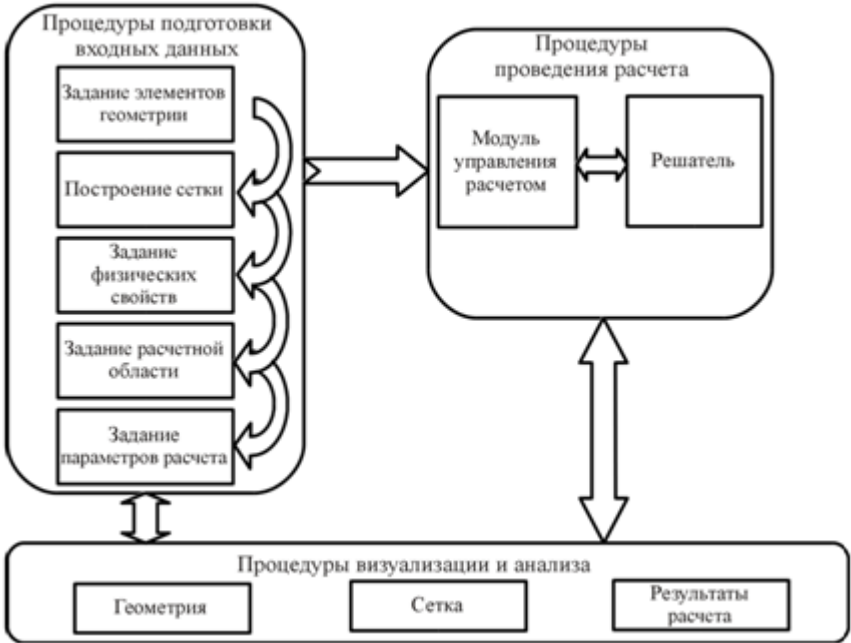


Рис. 1. Процедурная блок-схема платформы Теметос.

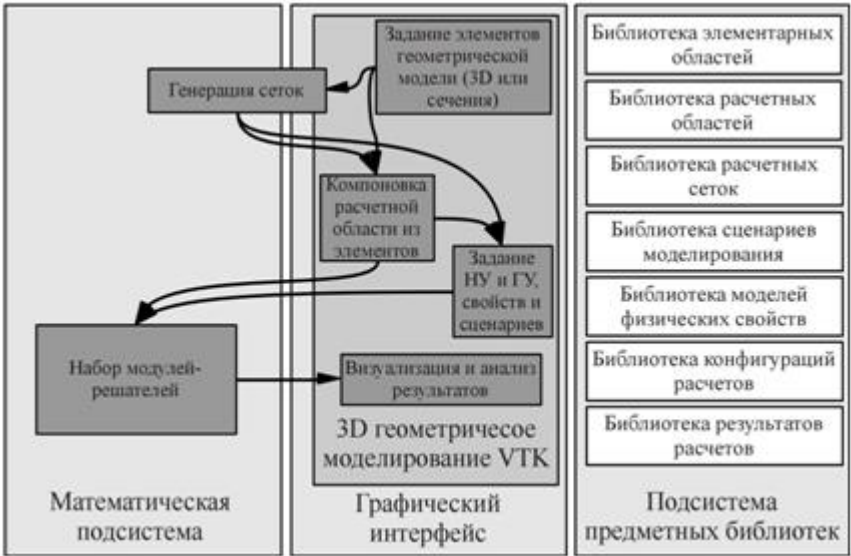


Рис. 2. Подсистемы платформы Теметос.

В соответствии с указанным разбиением основных процедур моделирования на группы программная платформа Теметос состоит из трех основных подсистем (см. рис. 2).

1. *Математическая подсистема.* Включает в себя основные средства проведения моделирующих расчетов, прежде всего набор программ-решателей, реализующих выбранные методы решения систем уравнений той или иной предметной области: уравнений магнитной гидродинамики, связанной термомеханики и др. Также подсистема содержит набор программ-построителей сеток (двумерных треугольных и четырехугольных; трехмерных). Подсистема состоит из набора консольных утилит. При этом утилиты могут быть как встроенными в платформу, так и исходно внешними (независимыми). Для этого разработаны интерфейсы, обеспечивающие трансформацию данных, которыми оперирует платформа, в форматы входных данных модулей-решателей.

2. *Инструментальная графическая подсистема.* Обеспечивает визуальную (трехмерную) подготовку геометрической модели рассматриваемого объекта или процесса, в случае необходимости – компоновку сложной расчетной области из простых подобластей, задание начальных и граничных условий, запуск расчета, визуализацию полученных результатов, а также взаимодействие с полным набором используемых для моделирования предметных библиотек. С программной точки зрения подсистема является кроссплатформенной, написана на языке C++ с использованием программной библиотеки оконного интерфейса Qt [8] и технологии трехмерной визуализации VTK [9]. Перечисленные библиотеки и технологии являются открытыми и свободнораспространяемыми.

3. *Подсистема предметных библиотек.* Содержит структурированную пополняемую иерархическую базу знаний о моделируемых объектах и физических процессах, в частности, наборы исследуемых расчетных областей и соответствующих им сеток, реализованные в виде программных модулей модели физических свойств материалов и сред, а также средства и стандарты взаимодействия библиотек и работы с ними. В основу подсистемы положен стандарт описания данных XML. Структура библиотек фиксирована в файловой системе платформы Теметос.

В процессе расчета взаимодействие пользователя с каждой из подсистем может осуществляться как через графическую среду, так и непосредственно. Осуществление вычислительного эксперимента для конкретной математической модели в платформе Теметос представляется в виде последовательной работы с рядом библиотек, осуществляемой в рамках единого интерфейса.

3. Физическая подсистема предметных библиотек

Выбор программных средств при разработке интегрированной платформы сопровождения вычислительного эксперимента направлен на обеспечение возможности простого расширения набора моделируемых объектов, физических и математических моделей, используемых сеток, модулей-решателей. Для этого используется концепция безболезненного роста программы [7], причем точки роста платформы предполагается оформлять в виде предметных библиотек, которые могут содержать как текстовые (XML) файлы описания данных, так и скомпилированные программные библиотеки, подключаемые к платформе при помощи стандартизуемых интерфейсов.

Информационная структура платформы Теметос основана на системе расширяемых предметных библиотек, призванных охватывать базу знаний о классе моделируемых объектов и явлений. В рамках данной базы осуществляется поддержка задания геометрически элементарных составляющих области моделирования, компоновки сложных расчетных областей, реализации моделей физических свойств сред и материалов, определения сценариев моделирования (начальных и граничных условий, временных и пространственных распределений источников и стоков и проч.). Пополнение предметных библиотек позволяет описывать и моделировать полный набор исследуемых объектов. Наполнение библиотек определяется прежде всего областью моделирования и, соответственно, используемым решателем. Содержимое библиотек хранится в файлах расширяемого формата представления данных XML, что делает их структуру прозрачной и позволяет осуществлять их редактирование и пополнение как с помощью разработанных редакторов библиотек, так и вручную в любом текстовом редакторе.

Элементы библиотек связаны друг с другом принципом соответствия, подобным применяемому в реляционных базах данных. Разработана система работы с набором предметных библиотек, позволяющая на каждой стадии подготовки расчета конструкции получать полную информацию о всех составляющих элементах модели.

В состав платформы входят следующие библиотеки.

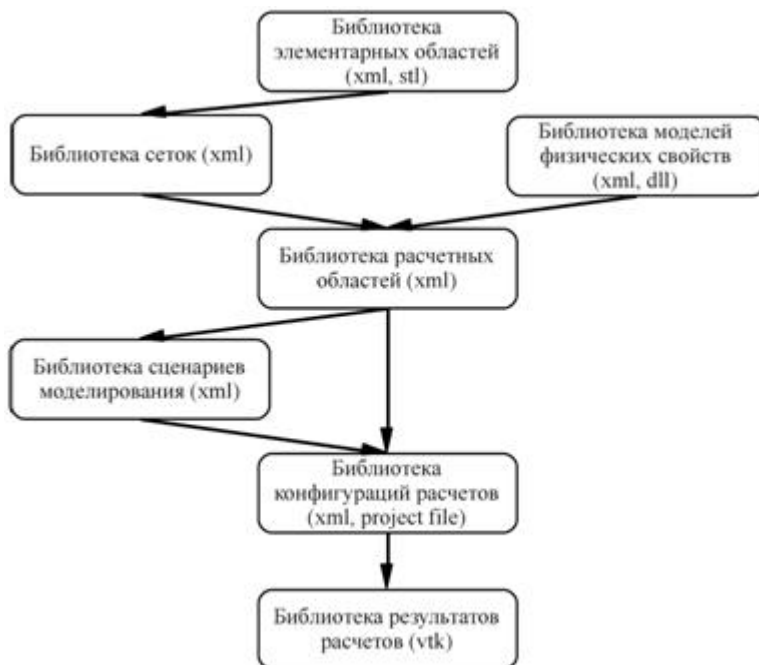


Рис. 3. Иерархия предметных библиотек.

1. Геометрическая библиотека элементарных областей (БЭО), содержащая наиболее общее (векторное) описание используемых при моделировании геометрических областей (в случае инженерных расчетов – элементов конструкций: лопаток, шестерней и проч.).
2. Библиотека сеток (БС), содержащая сетки, заданные в элементарных областях из БЭО.
3. Библиотека моделей физических свойств (БМФС), включающая как xml-описание физических свойств моделируемых материалов и сред в простых случаях, так и скомпилированные dll-библиотеки подпрограмм, описывающих сложное поведение параметров среды (теплопроводности, пористости, электрической проводимости и др.); набор доступных для описания физических параметров определяется возможностями конкретного модуля-решателя.
4. Библиотека расчетных областей (БРО), содержащая скомпонованные расчетные области, состоящие из относительно простых элементов, хранящихся в БЭО, вместе с выбранными для каждого элемента сеткой из БС и заданными моделями среды из БМФС.
5. Библиотека сценариев моделирования (БСМ), содержащая наборы входных данных, начальных и граничных условий, временных и

пространственных распределений источников для расчета объекта, компоновка которого содержится в БРО.

6. Библиотека конфигураций расчетов (БКР), содержащая наборы настроек модуля-решателя, включая составляющие решаемых систем уравнений, настройки численных методов и алгоритмов (в том числе параллельных), применяемых к расчету объекта из БРО с заданным сценарием моделирования из БСМ.
7. Библиотека результатов расчетов (БРР), содержащая полный набор выходных данных решателя при проведении расчета из БКР.

Иерархические связи предметных библиотек показаны на рис. 3. Взаимосвязи элементов различных библиотек применительно к конкретному объекту моделирования и конкретной постановке расчетной задачи фиксируются в xml-файле проекта.

4. Инструментальная графическая подсистема и алгоритм работы с платформой

Задача платформы Теметос – оснастить исследователя, разрабатывающего собственный или использующего готовый проблемно-ориентированный модуль-решатель, максимально удобными (прежде всего, графическими) средствами подготовки и проведения вычислительного эксперимента с применением этого решателя. В состав платформы включены графические редакторы предметных библиотек, а также инструменты, позволяющие «собрать» из заранее подготовленных единиц (геометрических моделей, моделей физических свойств, сеток, конфигураций решателя) расчет, произвести его запуск и отслеживание, проанализировать его результаты.

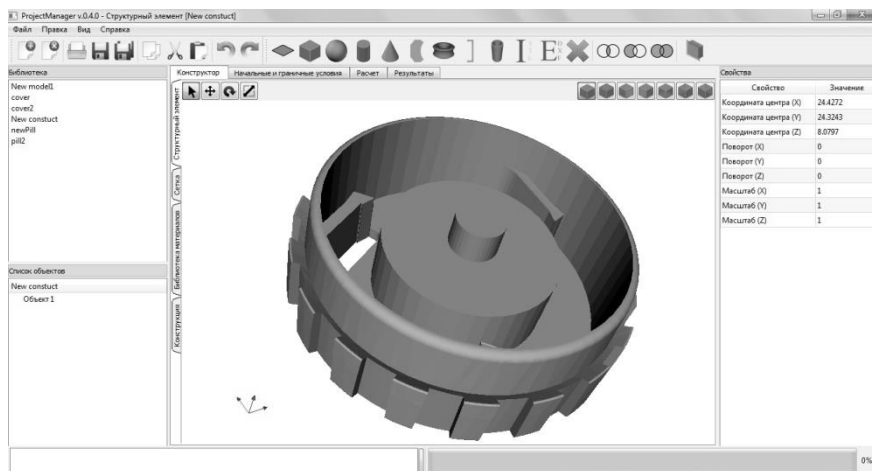


Рис. 4. Редактор элементарных трехмерных областей платформы Теметос.

Сразу после запуска платформы пользователь попадает в редактор элементарных трехмерных областей (рис. 4). Описание геометрии расчетной области исследуемого объекта ведется на различных, но взаимосвязанных, уровнях. Полная расчетная область описывается в два этапа:

- задание чертежей элементарных областей в виде трехмерных или плоских областей (с учетом осевой симметрии) с указанием всех размеров и подробным заданием формы каждого элемента;
- формирование из предварительно подготовленного набора элементарных областей своеобразной схемы-сборки расчетной области с указанием положения и набора физических моделей для каждого из элементов.

Подобный подход оказывается удобным в ряде случаев моделирования конструкций. В частности, численный алгоритм термомеханического решателя с учетом контакта и мультиконтакта упругих тел позволяет моделировать различные элементы инженерной конструкции как независимые твердые тела, взаимодействующие через поверхности контакта. Это позволяет независимо задавать геометрию, физические и модельные свойства каждого элемента, и моделирование конструкции в целом начинается именно с проектирования (введения в соответствующие библиотеки) индивидуальных элементов с наиболее подробным учетом особенностей их формы. Реализован импорт трехмерных областей, заданных в формате STL, импорт в который осуществляется из многих популярных CAD-систем.

Окно графической подсистемы меняется в зависимости от того, с каким именно блоком в данный момент работает пользователь. Работа с каждым из блоков представляет собой просмотр, редактирование и выбор для расчета элементов соответствующей блоку предметной библиотеки.

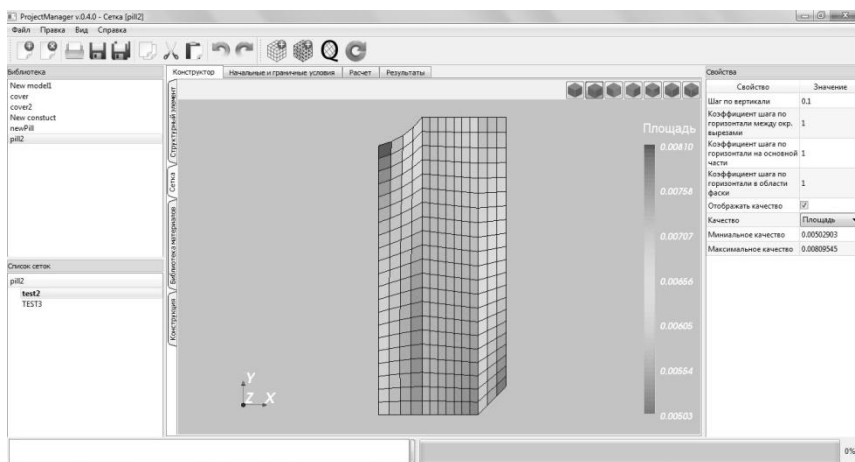


Рис. 5. Задание треугольной сетки в произвольной области.

Для каждой элементарной подобласти пользователь может задать одну или несколько сеток (рис. 5), причем одна и та же подобласть может входить в состав расчетной области многократно, имея при этом разные сетки. Платформа Теметос позволяет визуально и численно (используя ряд критериев) оценить качество сетки и при необходимости провести ее оптимизацию.

Далее пользователь производит выбор физических моделей сред и материалов, которые будут использоваться в расчете. Каждая среда представляется набором физических свойств, каждое из которых может быть задано либо непосредственно численно (значения сохраняются в xml-файле среды), либо указанием функции в подключаемой dll-библиотеке (ссылка на библиотеку и функцию также указывается в xml-файле среды). Модуль-решатель должен поддерживать подключение внешних библиотек. В рамках работы над платформой разработан унифицированный интерфейс подключения материальных библиотек, который может быть реализован в виде API платформы, доступного для использования во внешних решателях.

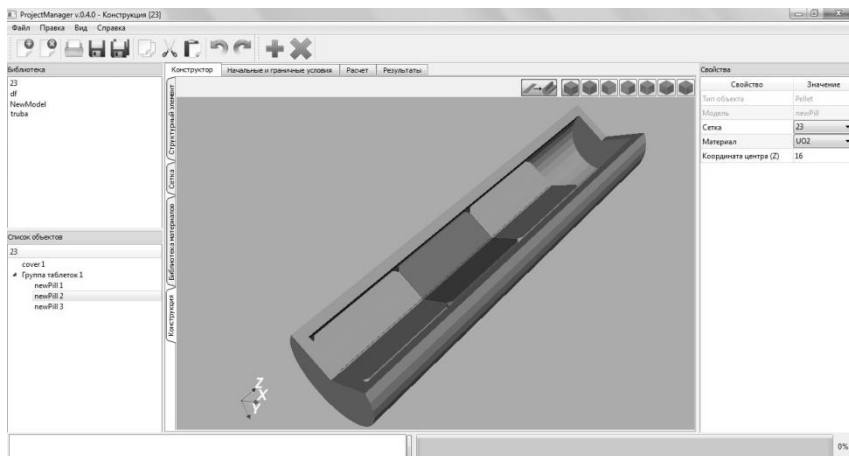


Рис. 6. Редактор расчетных областей – трехмерная форма отображения конструкции.

Из подготовленных элементарных подобластей с выбором для каждой из них сетки и набора физических свойств осуществляется сборка расчетной области в соответствующем редакторе (см. рис. 6). Далее для выбранной расчетной области (конструкции) задаются начальные и граничные условия, сценарий моделирования, распределения объемных и поверхностных источников. Для реализации этой возможности создан редактор сценариев, включающий парсер формул библиотеки VTK.

После того, как задана расчетная область, определены используемые модели материалов и сценарий моделирования, производится настройка и запуск на

расчет решателя. В соответствующем блоке платформы задаются параметры численного метода, используемые классы физических и математических моделей, осуществляется выбор моделируемой конструкции твэла, соответствующего ей сценария нагружения, а также общие параметры расчета, такие как конечное время, размерность задачи и проч. В процессе расчета предоставляется соответствующая телеметрическая информация.

Доступно как двумерное, так и трехмерное (в т.ч. двумерное осесимметричное) отображение результатов расчетов. Кроме того разработаны средства по трансформации способа отображения результатов – инструменты по созданию контурных графиков распределений физических величин, отображению векторных полей, соответствующих переменным задачи, а также генерации результирующей формы конструкции путем смещения узлов сетки на соответствующий вектор перемещения (см. рис. 7).

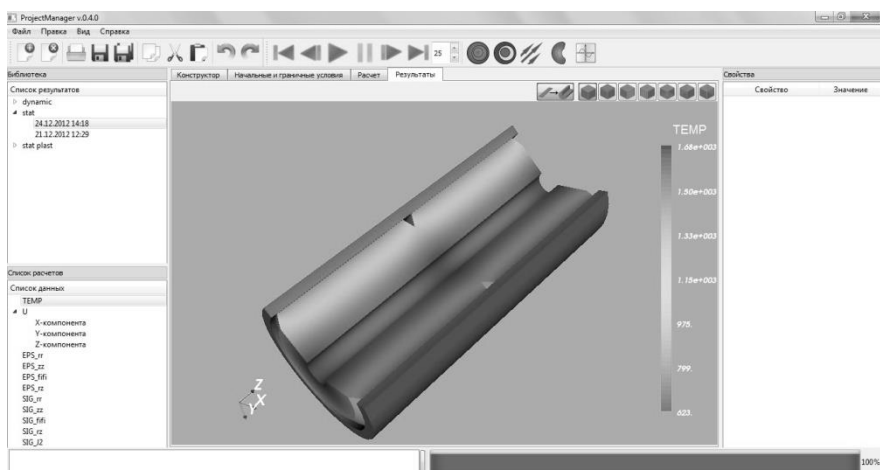


Рис. 7. Окно представления результатов расчетов.

5. Математическая подсистема

Математическая подсистема платформы Теметос включает основные расчетные программы и комплексы, используемые для проведения вычислительного эксперимента – программы-построители сеток и модули-решатели, реализующие методы численного исследования систем уравнений, соответствующих выбранной физической задаче. Архитектурой платформы Теметос предусмотрено, что каждая расчетная программа является независимой, обмен данными между расчетной программой и платформой производится только через файлы входных данных и настроек, при наличии входных файлов расчетная программа может быть запущена непосредственно из командной строки вне графической оболочки. При этом предполагается,

что порядок запуска расчетной программы и состав входных файлов описываются в отдельном интерфейсном файле xml-формата.

На данный момент платформа Теметос включает несколько строителей неструктурированных и структурированных сеток, причем каждый из них является независимым программным продуктом, а платформа содержит необходимые конвертеры для преобразования данных о геометрии в формат строителя и получаемых данных о сетке в другие используемые форматы. Поддерживается построение как неструктурированных треугольных (программа Gridder 2D [10]), так и четырехугольных сеток различных видов – как в областях общего вида, так и в специальных областях, соответствующих специфике задачи (параметрически заданные топливные таблетки в задаче о моделировании твэла).

На пилотном этапе разработке к платформе адаптируются два расчетных модуля – параллельный программный комплекс для решения двумерных задач идеальной магнитной гидродинамики RKDG-методом и термомеханический программный комплекс, включающий математические модели термоупругопластичного материала и хрупкого разрушения. Платформа применяется для задания расчетной области, запуска последовательного расчета и анализа получаемых результатов. Предполагается, что в дальнейшем в состав комплекса Теметос будут включены инструменты подготовки и проведения расчета на параллельных вычислительных комплексах, включая кластерные системы (К-100 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, УЭВК кафедры «Прикладная математика» МГТУ им. Н.Э. Баумана [11] и др.).

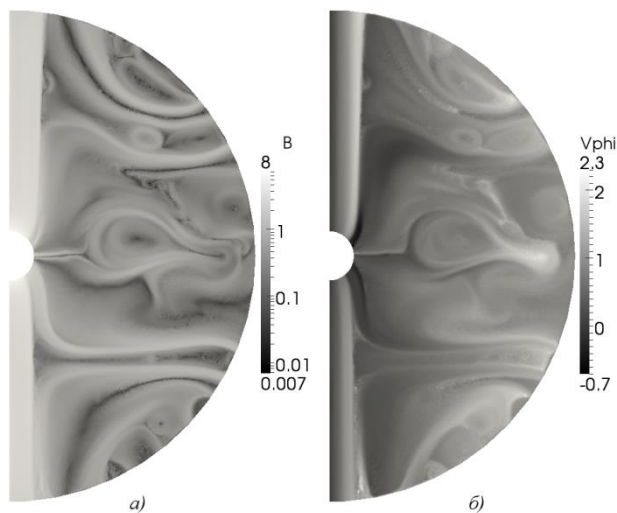


Рис. 8. Моделирование МРН в аккрецирующей плазме: модуль магнитного поля (а) и азимутальная скорость течения плазмы (б)

Результаты расчетов в двумерной осесимметричной постановке для задач о развитии магниторотационной неустойчивости (МРН) в аккрецирующей околозвездной плазме (постановку задачи см. в [12]) и задаче о разрушении цилиндрической конструкции под действием тепловой нагрузки при нагревании [6] приведены на рис. 8 и 9.

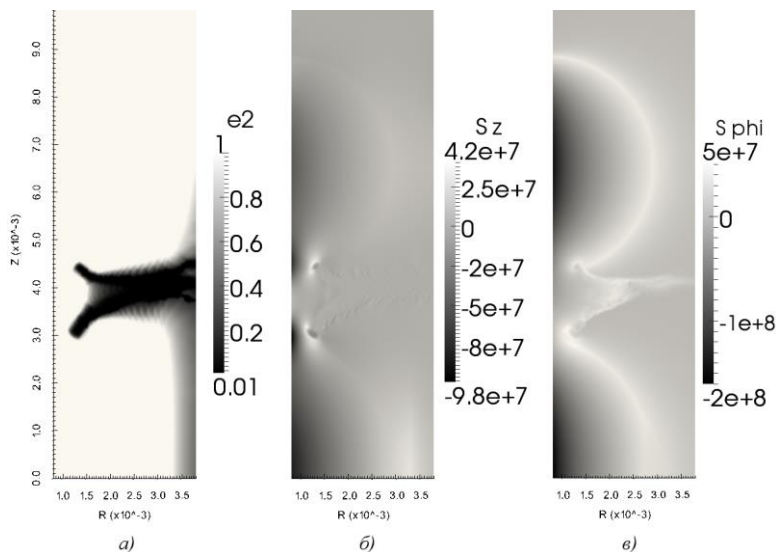


Рис. 9. Моделирование разрушения хрупкой конструкции под действием тепловой нагрузки в рамках модели размазанных трещин. а) – распределение функции памяти e_2 , эффективным образом описывающей появление трещины в материале ($e_2 = 1$ – неповрежденный материал, $e_2 = 0$ – полностью разрушенный). б) и в) – компоненты тензора напряжений σ_{zz} и $\sigma_{\varphi\varphi}$ соответственно.

6. Заключение

Представлен прототип интегрированной программной платформы для сопровождения вычислительного эксперимента в комплексных задачах математического моделирования. Предложена архитектура платформы, состоящая из трех подсистем различного назначения – математической, графическо-инструментальной и подсистемы семи предметных библиотек. Оформление в виде пополняемых библиотек элементов исследуемой модели – расчетных областей, физических свойств сред, сценариев моделирования – открывает возможности безболезненного расширения платформы. При этом каждая такая библиотека требует создания форматов данных и интерфейсов подключения внешних, не зависящих от платформы Теметос, потоков данных

и процедур. Дальнейшее развитие платформы будет осуществляться по следующим основным направлениям:

1. развитие и унификация форматов данных, прежде всего двумерных и трехмерных смешанных неструктурированных сеток;
2. развитие редактора задания сценария моделирования, адаптация его к различным предметным областям;
3. создание инструментария управления расчетом на удаленных машинах, в том числе на суперкомпьютерах кластерного типа;
4. реализация запуска параллельных версий модулей-решателей с получением подробной телеметрии параллельного расчета;
5. адаптация и включение в состав платформы новых модулей-решателей, превращение платформы в мультифизичный программный комплекс математического моделирования.

Список литературы

- [1]. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Методы численного анализа математических моделей. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 591 с.
- [2]. ANSYS // ANSYS, Inc. Режим доступа: <http://www.ansys.com/> (дата обращения: 29.05.2013).
- [3]. OpenFOAM // The OpenFOAM Foundation. Режим доступа: <http://www.openfoam.org> (дата обращения: 29.05.2013).
- [4]. Галанин М.П., Лукин В.В., Шаповалов К.Л. Параллельный алгоритм RKDG метода второго порядка для решения двумерных уравнений идеальной магнитной гидродинамики // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2013): труды международной научной конференции (1-5 апреля 2013 г., г. Челябинск). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2013. С. 116-126.
- [5]. Богатырь С.М., Галанин М.П., Крупкин А.В., Кузнецов В.И., Лукин В.В., Новиков В.В., Родин А.С., Станкевич И.В., Яковлев М.Е. Математическое моделирование термоупругого контактного взаимодействия осесимметричных тел. Инженерный журнал: наука и инновации, 2013, вып. 4. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mathmodel/hidden/667.html>.
- [6]. Семерикова М.А. Математическое моделирование хрупкого материала под действием тепловых нагрузок // Молодежный научно-технический вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 3. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/file/505616.html> (дата обращения: 29.05.2013).
- [7]. Горбунов-Посадов М.М. Как растет программа // ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. Режим доступа: <http://www.keldysh.ru/gorbunov/grow.htm> (дата обращения: 29.05.2013).
- [8]. Qt // Digia. Режим доступа: <http://qt.digia.com/> (дата обращения: 29.05.2013).
- [9]. The Visualization Toolkit // Kitware. Режим доступа: <http://www.vtk.org/> (дата обращения: 29.05.2013).
- [10]. Щеглов И.А. Программа для триангуляции сложных двумерных областей Gridder2d. // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН №60. 2008. 32 с.

- [11]. Лукин В.В., Марчевский И.К., Морева В.С., Попов А.Ю., Шаповалов К.Л., Щеглов Г.А. Учебно-экспериментальный вычислительный кластер. Ч.2. Примеры решения задач // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки. 2012. № 4. С. 82-102.
- [12]. Велихов Е. П., Сычугов К. Р., Четкин В. М., Луговский А. Ю., Колдоба А.В. Магниторотационная неустойчивость в аккрецирующей оболочке протозвезды и образование крупномасштабной структуры магнитного поля // Астрономический журнал. 2012. Т. 89, №. 2. С. 107-119.

Prototype of an integrated software platform for tracking computer simulations to solve complex problems of mathematical modeling

M.P. Galanin <Galan@keldysh.ru>

M.M. Gorbunov-Posadov <Gorbunov@keldysh.ru>

A.V. Ermakov <Ermakov@keldysh.ru>

V.V. Lukin <VVLukin@gmail.com>

A.S. Rodin <rals@bk.ru>

K.L. Shapovalov <ShapovalovKL@yandex.ru>

*Keldysh Institute of Applied Mathematics, Miusskaya sq., 4, Moscow, 125047,
Russia*

Abstract. The software platform for mathematical modeling support Temetos is described. The Temetos platform is the integrated graphical tool environment for the study of mathematical models of physical processes and technical systems. Temetos platform provides opportunities for preparation of geometric and physical models of the object; external or built-in problem-oriented modules configuration, including numerical method parameters configuration; computational module launch and executing control; calculations results visualization and analysis. The platform consists of three subsystems: the mathematical subsystem, including command-line utilities for the computational domain discretization and triangulation and software modules for the numerical solution of the mathematical model differential equation systems; instrumental graphics subsystem, including tools for the 3D geometric design of the investigated object model; subject libraries subsystem containing structured knowledgebase for the simulated structures, constructions and physical processes (elements of the libraries are: 3D object models, meshes, material physical models and others.). The subject libraries subsystem is the base of platform information structure. It contains of free format XML files describing knowledgebase elements. Hierarchical library architecture and universal data interfaces leads the platform to grow and to implement the new subject areas and mathematical models in easy way. As examples of platform implementation the simulation of plasma flow instability in astrophysical conditions and model of brittle material failure under heat load are considered.

Keywords: mathematical modeling, integrated software platform, computational experiment, model knowledgebase

References

- [1]. Galanin M.P., Savenkov E.B. Metody chislennogo analiza matematicheskikh modelej [Methods for mathematical models numerical analysis]. MGTU im. N. E. Baumana Publ. 2010. 591 pp. (In Russian)
- [2]. ANSYS - ANSYS, Inc.: <http://www.ansys.com/>
- [3]. OpenFOAM // The OpenFOAM Foundation: <http://www.openfoam.org>
- [4]. Galanin M.P., Lukin V.V., SHapovalov K.L. Parallel'nyj algoritm RKDG metoda vtorogo poryadka dlya resheniya dvumernykh uravnenij ideal'noj magnitnoj gidrodinamiki [Parallel algorithm of 2nd order RKDG method for 2D ideal MHD equations solution] Parallel'nye vychislitel'nye tekhnologii (PaVT'2013): trudy mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii [Parallel computing technologies: proceedings of international conference] Chelyabinsk, YurGU. 2013. Pp. 116-126.
- [5]. Bogatyr' S.M., Galanin M.P., Krupkin A.V., Kuznetsov V.I., Lukin V.V., Novikov V.V., Rodin A.S., Stankevich I.V., Yakovlev M.E. Matematicheskoe modelirovanie termouprugogo kontaktного vzaimodejstviya osesimmetrichnykh tel [Mathematical modeling of axysymmetric bodies thermoelastic contact interaction]. Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovatsii [Engineer journal: science and innovations]. 2013, 4.
- [6]. Semerikova M.A. Matematicheskoe modelirovanie khрупkogo materiala pod dejstviem teplovykh nagruzok [Mathematical modeling of brittle material behavior under the influence of heat loads] Molodezhnyj nauchno-tehnicheskij vestnik. MGTU im. N.E. Baumana. [Young scientists scientific and technick journal] 2013. № 3.
- [7]. Gorbunov-Posadov M.M. Kak rastet programma [How the program grows] KIAM RAS: <http://www.keldysh.ru/gorbunov/grow.htm>
- [8]. Qt Digia. <http://qt.digia.com>
- [9]. The Visualization Toolkit Kitware. <http://www.vtk.org>
- [10]. Shcheglov I.A. Programma dlya triangulyatsii slozhnykh dvumernykh oblastej Gridder2d [The software for complex 2D domains triangulation Gridder2D] KIAM RAS Preprint 60. 2008. 32 pp.
- [11]. Lukin V.V., Marchevskij I.K., Moreva V.S., Popov A.YU., Shapovalov K.L., Shcheglov G.A. Uchebno-ehksperimental'nyj vychislitel'nyj klaster. Ch.2. Primery resheniya zadach [Computational cluster for studies and experiments. P. 2. Examples of problems solution] Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Estestvennye nauki. [BMSTU journal: Natural sciences] 2012, 4, pp. 82-102.
- [12]. E.P. Velikhov, K.R. Sychugov, V.M. Chechetkin, A.Yu. Lugovskii, A.V. Koldoba. Magneto-rotational instability in the accreting envelope of a protostar and the formation of the large-scale magnetic field. Astronomy Reports, 2012. 56, 2. Pp. 84-95. doi: 10.1134/S106377291201009X

