Сервисно-ориентированный подход к использованию систем инженерного проектирования и анализа в распределенных вычислительных средах*

Г.И. Радченко

Южно-Уральский государственный университет

Рациональной альтернативой созданию собственного суперкомпьютерного центра для решения сложных задач инженерного моделирования является аренда вычислительных и программных ресурсов в режиме удаленного доступа у центров коллективного пользования, функционирующих при крупных университетах, академических институтах и других организациях. Однако при этом возникает целый комплекс проблем, связанных с организацией прозрачного и безопасного доступа к таким ресурсам. В статье предложено описание технологии CAEBeans, обеспечивающей автоматизированную генерацию проблемно-ориентированных грид-сервисов, позволяющих использовать программные системы для инженерного проектирования и анализа в распределенных вычислительных средах.

1. Введение

Системы компьютерного проектирования (CAE - Computer Aided Engineering), ориентированные на разработку сложных технологических процессов, конструкций, и материалов, являются сегодня одним из ключевых факторов обеспечения конкурентоспособности любого высокотехнологического производства. Использование таких систем дает возможность проводить *виртуальные* эксперименты, которые в реальности выполнить затруднительно или невозможно. Это позволяет значительно повысить точность анализа вариантов проектных решений и в десятки раз сократить путь от генерации идеи до ее воплощения в реальном промышленном производстве [18].

Точность результатов компьютерного моделирования во многом зависит от степени детализации сеток, используемых для проведения вычислительных экспериментов. На сегодняшний день, постоянно возрастает вычислительная сложность задач инженерного проектирования, и требуются значительные вычислительные ресурсы для выполнения инженерного моделирования [2]. Решение этой проблемы заключается в использовании многопроцессорных систем.

Процесс решения задач инженерного проектирования с использованием суперкомпьютерных ресурсов для рядового пользователя сопряжен с определенными трудностями. С одной стороны, от него требуется наличие специфических знаний, умений и навыков в области высокопроизводительных вычислений. С другой стороны, для решения задач инженерного проектирования пользователю требуется изучить интерфейс и особенности работы всех программных компонентов, входящих в технологический цикл решения задачи [12]. Все эти факторы затрудняют широкое внедрение систем компьютерного инженерного проектирования в практику НИОКР.

Рациональной альтернативой созданию собственного суперкомпьютерного центра является аренда вычислительных и программных ресурсов в режиме удаленного доступа у центров коллективного пользования, функционирующих при крупных университетах, академических институтах и других организациях. Однако при этом возникает целый комплекс проблем, связанных с обеспечением безопасности вычислительных систем и данных. Указанный комплекс проблем можно решить посредством применения концепции грид вычислений (Grid Computing) [14] и родственной ей концепции облачных вычислений (Cloud Computing) [15] в соответствии с которыми, пользователю предоставляется конечный проблемно-

* Проект выполнен при поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации (номер проекта МК-1987.2011.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 11-07-00478-а).

ориентированный сервис, обеспечивающий решение задач на базе ресурсов распределенных вычислительных систем.

Подход к сервисно-ориентированному предоставлению прикладных программных пакетов в виде ресурсов распределенных вычислительных сред переживает бум в последние несколько лет [1, 6]. Но данные системы не ориентированы на создание виртуальных испытательных стендов, обеспечивающих проблемно-ориентированную постановку и решение задач инженерного моделирования профессиональными инженерами.

В работах [13, 19] раскрываются аспекты разработки системы совместного проектирования, ориентированной на решение задач инженерного проектирования в динамических распределенных группах разработчиков. В связи с потребностью постоянного взаимодействия между участниками команды инженеров в процессе разработки, в качестве базовой платформы данной системы была выбрана концепция P2P-вычислений. Но применение такого подхода ориентировано не на предоставление конечному пользователю готового продукта, предоставляющего ресурсы распределенной сети, а на поддержку процесса совместного проектирования командой разработчиков.

В работах [16, 17] представлена концепция грид-среды для совместного проектирования (Collaborative Manufactoring Grid) система совместной разработки, основанная на стандартах грид-систем. Реализована возможность решения задач инженерного моделирования посредством указания параметров моделирования и получения конечных результатов через веб-портал. В качестве недостатков этой системы можно отметить отсутствие стандартизированного подхода к созданию виртуальных испытательных стендов; отсутствие возможности конкретизации проблемно-ориентированных оболочек, обеспечивающих «подгонку» задач к конкретным требованиям пользователя; отсутствие реализации стандарта WSRF. Также, отсутствует брокер ресурсов, обеспечивающий прозрачное для пользователя предоставление ресурсов распределенной вычислительной среды, наиболее соответствующих требованиям текущей задачи.

2. Технология CAEBeans

2.1 Основные понятия

Технологии CAEBeans представляет собой комплекс моделей, методов и алгоритмов, направленных на автоматизированное создание иерархий распределенных проблемно-ориентированных оболочек над инженерными (CAE) пакетами на основе сервисно-ориентированного подхода и концепции облачных вычислений.

Задача инженерного моделирования включает в себя:

- геометрическую модель объекта исследования и (или) вычислительную сетку, разбивающую моделируемую область на дискретные подобласти;
- граничные условия, физические характеристики и параметры взаимодействия отдельных компонентов исследуемой области;
- описание неизвестных величин, значения которых требуется получить в результате решения задачи;
- требования к аппаратным и программным ресурсам, обеспечивающим процесс моделирования.

Параметром задачи инженерного моделирования назовем величину, значение которой влияет на конечный результат моделирования и может варьироваться в определенном диапазоне значений. Каждый параметр задачи инженерного моделирования имеет определенную семантику, отражая свойство проблемной области, либо некоторую особенность процесса решения задачи [9].

Полным дескриптором задачи назовем множество параметров, однозначно описывающих задачу инженерного моделирования.

Логическим планом решения задачи инженерного моделирования назовем ориентированный граф, в вершинах которого могут находиться узлы двух типов [11]:

- *действия*, выполняемые отдельными инженерными пакетами;
- *узлы управления* потоком решения задачи.

Определим *класс задач инженерного моделирования* как множество задач, у которых совпадает структура полного дескриптора задачи и для которых можно описать единый логический план, приводящий к решению.

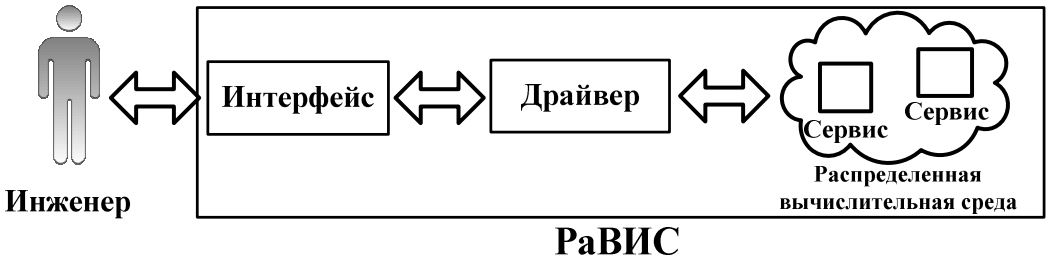

Рис. 1. Обобщенная схема распределенного виртуального испытательного стенда.

Внедрение ресурсов CAE-пакетов в распределенные вычислительные среды основывается на концепции распределенного виртуального испытательного стенда. *Распределенный виртуальный испытательный стенд (РаВИС)* – это программно-аппаратный комплекс, обеспечивающий проведение работ инженерного моделирования в распределенной вычислительной среде в рамках определенного класса задач.

РаВИС включает в себя (см. рис. 1):

– *интерфейс,* обеспечивающий постановку определенного класса задач инженерного моделирования;
– *драйвер:* набор программных средств, обеспечивающих использование сервисов распределенной вычислительной среды для проведения виртуального эксперимента;
– *сервисы распределенной вычислительной среды:* множество вычислительных систем, входящих в распределенную вычислительную среду, в совокупности с установленными на них программными компонентами, обеспечивающими решение задач инженерного моделирования и поддерживающими безопасные стандартизованные методы удаленного взаимодействия.

Процессы разработки и функционирования РаВИС определяются технологией CAEBeans. *Технология CAEBeans* – это совокупность теории и практической техники, на которые опирается процесс создания и использования распределенных виртуальных испытательных стендов. Технология CAEBeans включает в себя:

1) концептуальные средства, которые определяют методы разработки и структуру РаВИС;
2) организационные средства, которые определяют форму труда и распределение обязанностей в команде разработчиков и пользователей РаВИС;
3) программные средства разработки и среду исполнения РаВИС.

2.2 Архитектура CAEBeans

Оболочка CAEBean – это основная структурная единица, формирующая РаВИС. В соответствии с технологией CAEBeans выделяются четыре слоя структуры РаВИС, каждый из которых представляется своим типом оболочек CAEBeans (см. рис. 2):

1) концептуальный слой (проблемный CAEBean);
2) логический слой (потоковый CAEBean);
3) физический слой (компонентный CAEBean);
4) системный слой (системный CAEBean).

Концептуальный слой РаВИС формируется на основе оболочек CAEBeans, которые мы будем называть *проблемными*. Пользовательский интерфейс, предоставляемый проблемным CAEBean, является основным средством взаимодействия пользователя с системой CAEBeans. Посредством проблемного CAEBean, ориентированного на решение конкретного класса задач инженерного моделирования, пользователь может произвести постановку задачи; проследить за ходом решения поставленной задачи; получить результаты решения. Технология CAEBeans предусматривает возможность формирования *дерева проблемных CAEBeans*. Она позволяет адаптировать проблемно-ориентированный интерфейс конкретного класса задач инженерного моделирования под нужды определенной категории пользователей. Дочерние проблемные оболочки могут конкретизировать класс задач, решаемых родительской оболочкой, путем выделе-

ния и инкапсуляции групп проблемных параметров, значения которых определяются на данном уровне абстракции.

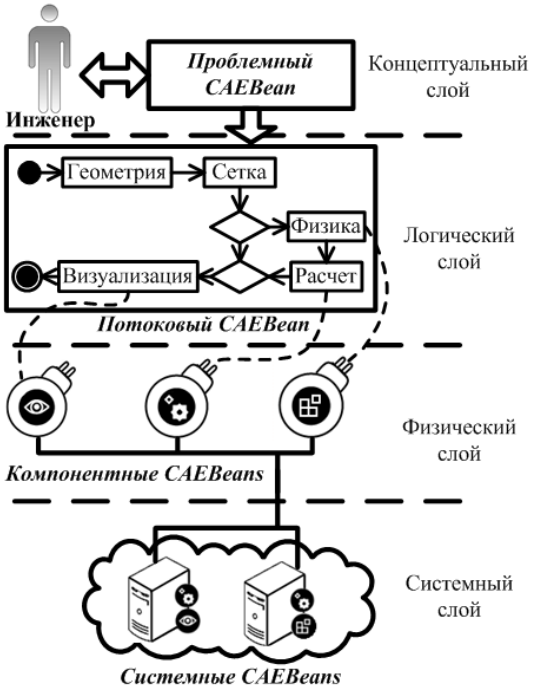

Рис. 2. Обобщенная схема слоев РаВИС.

Логический слой РаВИС представлен *потоковым CAEBean*, реализующим логический план решения определенного класса задач компьютерного моделирования (см рис. 3). Для формирования логического плана используются элементы нотации *диаграммы деятельности* стандарта UML 2.0. *Поток управления* – это ребро, задающее протекание управления, но не данных. Информация, необходимая для исполнения любого узла логического плана содержится в полном дескрипторе задачи. В ходе решения задачи, любой узел может обратиться к дескриптору для получения значений входных параметров и сохранения результатов в соответствующих выходных параметрах.

Процесс выполнения деятельности можно представить себе как обход экземпляра графа логического плана, содержащего маркеры управления. Маркер управления указывает на наличие управления на некотором этапе процесса вычисления, представленным узлом или потоком. Маркеры управления не имеют внутренней структуры. Выполнение действия разрешается, если во всех его входных потоках присутствуют маркеры. Некоторые виды узлов управления могут начинать работу в момент, когда на заданном подмножестве входных ребер появятся маркеры управления. Когда работа узла завершается, в каждом из его исходящих потоков управления появляется маркер управления.

Узел действия логического плана реализует определенное действие инженерного моделирования. При исполнении узла действия, потоковый CAEBean обеспечивает взаимодействие с дескриптором задачи: получение значений входных параметров для инициации работы действия и запись значений выходных параметров, вычисленных в результате исполнения действия. Действие реализуется соответствующим компонентным CAEBean, находящимся на физическом слое РаВИС.

Компонентные CAEBeans, представляющие физический слой РаВИС, отвечают за процесс постановки и решения отдельных действий инженерного моделирования средствами конкретных инженерных пакетов. Основная функция компонентного CAEBean – преобразование проблемно-ориентированного описания действия инженерного моделирования в *компонентно-ориентированную форму*. По окончании процесса решения, компонентный CAEBean обеспечивает преобразование компонентно-ориентированных результатов решения задачи в проблемно-ориентированные. Компонентный CAEBean задает абстрактное действие, которое не может быть реализовано само по себе, так как не обеспечено реальными программными, аппаратными

и лицензионными ресурсами. В процессе исполнения, каждому компонентному CAEBean должен быть найден и предоставлен физический ресурс, отвечающий всем требованиям, необходимым для реализации специфицированной в нем деятельности. В рамках системы CAEBeans, физические ресурсы реализуются посредством системных CAEBeans.

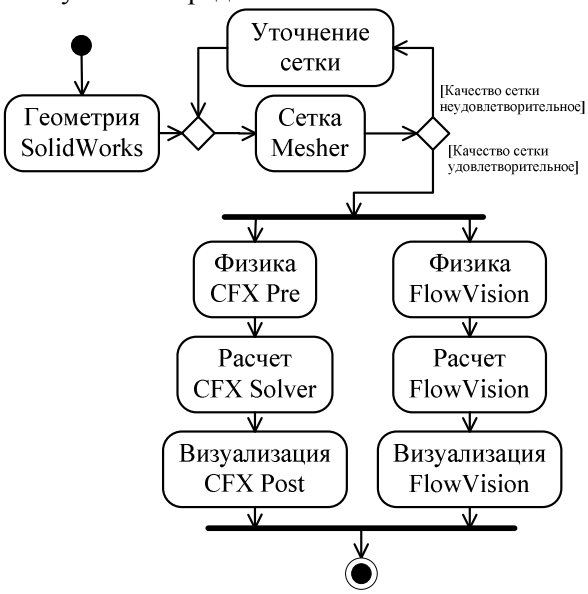

Рис. 3. Пример логического плана решения задачи инженерного моделирования.

Системным CAEBean называется оболочка системного слоя РаВИС, предоставляющая функциональные возможности физического ресурса в распределенной вычислительной среде и обеспечивающая сервисно ориентированный подход к постановке задач и получению результатов. Системный CAEBean обеспечивает изолированное рабочее пространство для исполнения каждого действия инженерного моделирования; предоставляет программный интерфейс для загрузки исходных данных, удаленного запуска действия инженерного моделирования и передачи результатов решения.

2.3 Разработка и использование РаВИС

Программные средства CAEBeans можно разбить на два типа: средства исполнения и средства разработки РаВИС. Разработка проблемно-ориентированной части распределенного виртуального испытательного стенда ведется в системе *Конструктор*. Посредством Конструктора прикладной программист формирует оболочки концептуального, логического и физического слоя РаВИС, отвечающие за решение конкретного класса задач инженерного моделирования.

В соответствии с технологией CAEBeans работа РаВИС осуществляется с помощью следующих четырех программных систем:

1) клиент;
2) сервер;
3) брокер ресурсов;
4) набор целевых систем.

Клиент предоставляет унифицированный интерфейс конкретного РаВИС. *Сервер* отвечает за хранение и исполнение РаВИС. *Брокер ресурсов* – это автоматизированная система регистрации, анализа и предоставления ресурсов распределенной вычислительной среды. *Целевая система* – это совокупность грид-сервисов, которые имеют доступ к пространству программных, аппаратных и лицензионных ресурсов некоторого узла грид, и поддерживает аутентификацию и авторизацию пользователей.

Разработка РаВИС – это сложный процесс, который невозможен без участия специалистов в различных областях информационных технологий и инженерного проектирования и анализа. Можно выделить три основные роли в разработке и использовании РаВИС:

1) *инженер* - это пользователь системы CAEBeans, решающий задачу инженерного моделирования на основе созданного для этой цели распределенного виртуального испытательного стенда;
2) *прикладной программист* - это специалист в области разработки РаВИС посредством технологии CAEBeans;
3) *системный программист* - это специалист в области информационных технологий, отвечающий за формирование распределенной вычислительной среды для исполнения РаВИС.

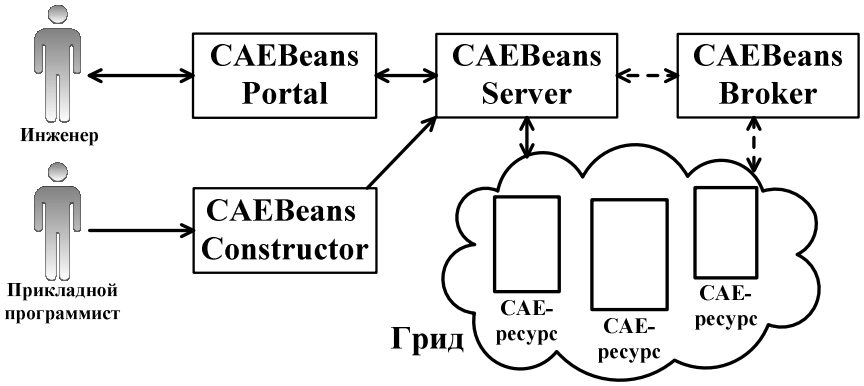

Рис. 4. Общая схема взаимодействия компонентов системы CAEBeans.

3. Система CAEBeans

Для поддержки технологии CAEBeans был разработан программный комплекс *система CAEBeans*, обеспечивающий разработку и исполнение РаВИС В систему CAEBeans [10] входят следующие компоненты (см. рис. 4):

1. *CAEBeans Constructor* – интегрированная среда разработки проблемно-ориентированных оболочек для грид;
2. *CAEBeans Portal* – это веб-приложение, обеспечивающее выбор, загрузку, запуск и получение результатов моделирования САЕ-задач;
3. *CAEBeans Server* – хранилище и интерпретатор САЕ-проектов;
4. *CAEBeans Broker* – автоматизированная система регистрации, анализа и предоставления САЕ-ресурсов;
5. *САЕ-ресурсы* – грид-сервисы, обеспечивающие удаленную постановку и решение задач средствами некоторого инженерного пакета на базе конкретной целевой системы.

CAEBeans Constructor – это интегрированная среда разработки РаВИС на основе САЕ-проектов. CAEBeans Constructor предоставляет прикладному программисту пользовательский интерфейс для разработки оболочек CAEBeans концептуального, логического и физического слоев. В соответствии с этим, пользовательский интерфейс, обеспечивающий разработку САЕ-проектов в среде CAEBeans Constructor, разделен на 3 секции, обеспечивающих разработку проблемных, логических и физических оболочек CAEBean соответственно.

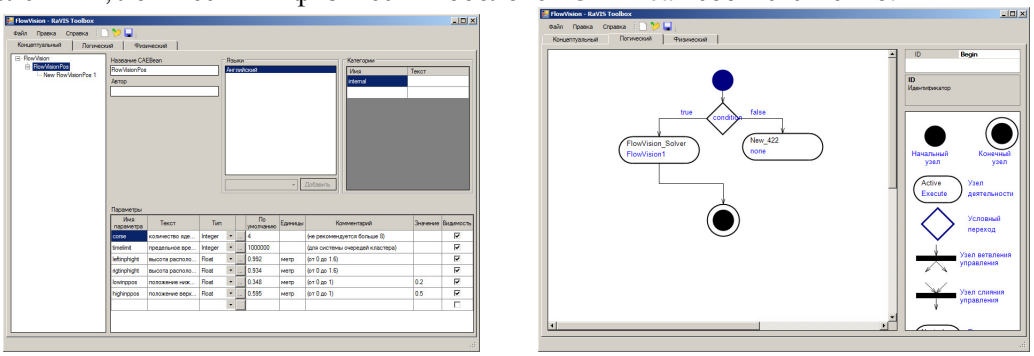

Рис. 5. Пользовательский интерфейс концептуального и логического слоя САЕ-проекта.

CAEBeans Portal – это веб-приложение, доступное через интернет, обеспечивающее пользовательский интерфейс для постановки и решения задач инженерного моделирования средствами системы CAEBeans. Встроенный генератор веб-форм обеспечивает автоматическую генерацию пользовательского интерфейса для постановки задач инженерного моделирования, на основе описания параметров соответствующего проблемного CAEBean.

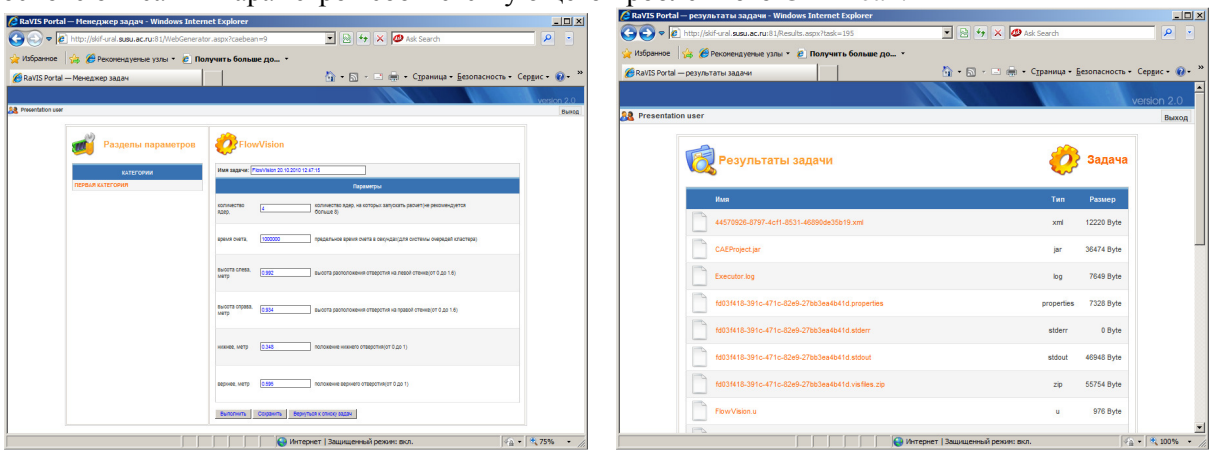

Рис. 6. Пользовательский интерфейс постановки задачи и получения результатов моделирования в CAEBeans Portal.

В качестве платформы для реализации грид-сервисов, был выбрана технология грид-вычислений на базе системы UNICORE 6. Основным достоинством использования системы UNICORE 6 для разработки распределенных вычислительных систем можно считать наличие богатого арсенала различных клиентов, обеспечивающих взаимодействие пользователя с ресурсами вычислительной сети, а также развитых средств обеспечения безопасности при разработке грид-приложений.

CAEBeans Server – это грид-сервис, обеспечивающий хранение и интерпретацию CAE-проектов. Процесс исполнения логического плана поддерживается посредством *монитора логического плана*. Он постоянно производит проверку состояния всех узлов логического плана. Готовность узла к исполнению зависит от наличия маркеров управления в потоках управления, входящих в узел. В зависимости от типа узлов, может требоваться наличие одного или нескольких маркеров управления на входных потоках управления. Алгоритм работы монитора логического плана приведен на рисунке 7.

```
// пока происходит исполнение логического плана
while (running) {
      // цикл по всем узлам логического плана
      foreach (AbstractWorkflowNode node in workflow) {
            if node.ready(){    //Если узел готов к исполнению
                  node.reset();//Сброс        информации        о        поступивших
                               //маркерах управления
                  new Thread(node).start(); //Исполнение узла
            } //if                          //в отдельном потоке
      }//foreach
}//while
```

Рис. 7. Алгоритм работы монитора потокового CAEBean**.**

CAE-ресурсом является экземпляр системного CAEBean, предоставляющий ресурсы некоторого инженерного пакета на базе конкретной целевой системы. CAE-ресурс обеспечивает:

– получение данных для решения задачи средствами базового инженерного пакета из CAEBeans Server или внешнего источника данных;
– запуск и автоматизированное решение задачи инженерного моделирования;
– передачу результатов решения CAEBeans Server или во внешнее хранилище данных.

CAEBeans Broker обеспечивает автоматизированную регистрацию, поиск и выделение CAE-ресурсов для реализации действий инженерного проектирования. CAEBeans Broker обеспечивает распределение действий инженерного моделирования по виртуальным CAE-ресурсам. Система CAEBeans Broker обеспечивает распределение действий инженерного моделирования

по виртуальным CAE-ресурсам. В структуре системы CAEBeans Broker можно выделить следующие основные блоки (см. рис. 8.):

- *входная очередь заданий (inputQueue)* обеспечивает получение от сервера запросов на предоставление CAE-ресурсов;
- *распределитель заданий* обеспечивает анализ поступающих запросов и их распределение по очередям заданий;
- *каталог ресурсов* хранит информацию о характеристиках всех физических вычислительных узлов, входящих в грид, и виртуальных CAE-ресурсах находящихся на данных узлах;
- *блок перераспределения ресурсов* обеспечивает возможность удаления старых и формирования новых CAE-ресурсов на основе доступных физических ресурсов;
- *очередь ожидания (waitQueue),* в которую попадают задания, которые не могут быть исполнены на существующем наборе CAE-ресурсов, но можно использовать перераспределение для получения CAE-ресурсов, удовлетворяющих требованиям.

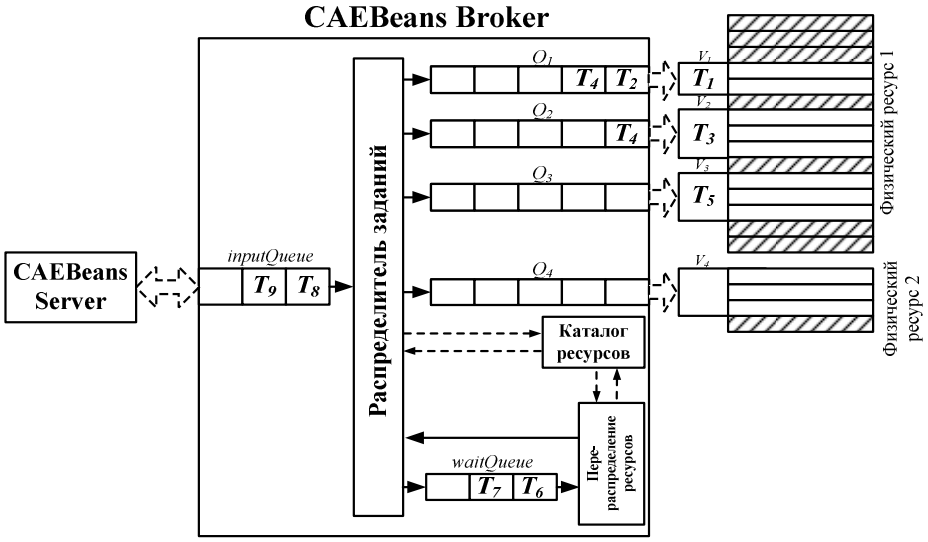

Рис. 8. Структура очередей CAEBeans Broker.

4. Испытания системы CAEBeans

Для проверки возможностей, предоставляемых системой CAEBeans в области создания и исполнения виртуальных испытательных стендов, был разработан набор РаВИС, обеспечивающих решение различных задач инженерного моделирования средствами различных CAE-пакетов. Были произведены исследования методов взаимодействия с современными инженерными пакетами, и проанализированы API, предоставляющие методы автоматизированного решения задач инженерного моделирования. Для испытания системы CAEBeans были разработаны оболочки для решения задач средствами наиболее распространенных пакетов инженерного моделирования: ANSYS CFX [8], ANSYS Mechanical [5], ABAQUS [7], DEFORM [4].

В качестве основной испытательной задачи выбрана задача моделирования процесса закалки и охлаждения труб и анализа влияния различных аспектов процесса закалки на качество производимой продукции («Распределенный виртуальный испытательный стенд «Термообработка»), решаемая по заказу ОАО «Челябинский трубопрокатный завод» [3].

Перед созданием компьютерной модели процесса термической обработки были произведены тепловизионные исследования процесса закалки труб непосредственно на производстве. Был произведен сбор информации о геометрии заготовок и температурных полях, величине разностенности с разверткой по длине и окружности заготовки, величине начальной овальности с разверткой по длине и кривизне оси заготовки.

При разработке проблемного CAEBean была предусмотрена возможность изменения следующих технических параметров индукционной установки: количество индукторов, частота и

сила тока, длина индукторов, количество и конфигурация водяных струй, давление и расход воды, скорость движения трубы через индукционную установку, частота вращения труб (см. рис. 9). Также, была предусмотрена возможность моделирования термообработки труб из различных марок сталей (путем указания физических характеристик материала).

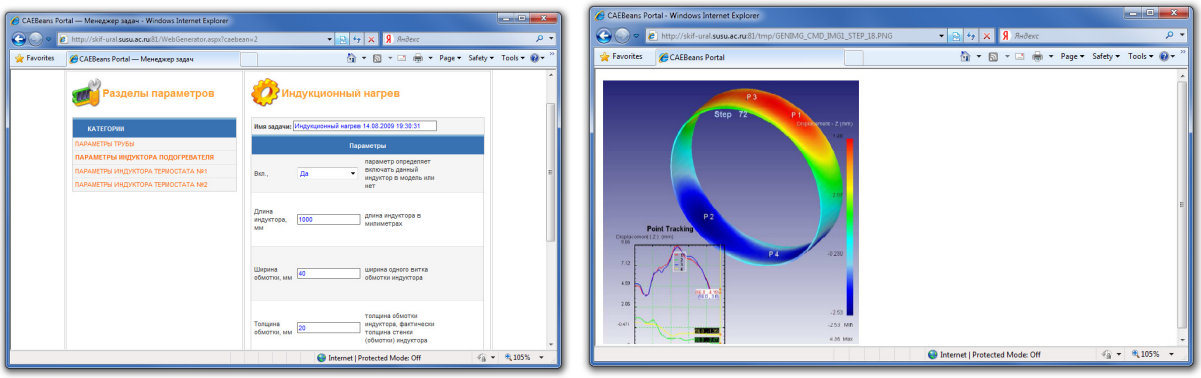

Рис. 9. Интерфейс постановки задачи в распределенном виртуальном испытательном стенде «Термообработка» и пример визуализации результата моделирования.

Система CAEBeans была развернута на базе суперкомпьютерных ресурсов СКЦ ЮУрГУ. Системы CAEBeans Portal, CAEBeans Server и CAEBeans Broker были установлены на вычислительных узлах суперкомпьютера СКИФ-Урал. В системе CAEBeans Constructor был разработан САЕ-проект РаВИС. В CAEBeans Portal был загружен проблемный CAEBean созданного виртуального испытательного стенда. На CAEBeans Portal была создана тестовая учетная запись и для нее предоставлены права на разработанный виртуальный испытательный стенд.

На узлах суперкомпьютера СКИФ Урал была установлена и настроена грид-система Unicore. В Unicore была создана целевая система, реализующая системный CAEBean для взаимодействия с пакетом DEFORM. На вычислительных узлах суперкомпьютера СКИФ Урал был установлен пакет DEFORM.

Доступ инженера к CAEBeans Portal осуществляется посредством интернет-обозревателя. После авторизации менеджер задач отображает список доступных испытательных стендов и список запущенных расчетов. В менеджере задач можно создать и запустить новую задачу моделирования индукционного нагрева. По окончанию расчетов изображения с результатами моделирования доступны в разделе результатов задачи.

5. Заключение

В работе были рассмотрены вопросы, связанные с внедрением систем инженерного проектирования и анализа в распределенные вычислительные среды. Было произведено исследование современных подходов по организации распределенных вычислительных систем. Были исследованы основные аспекты внедрения систем инженерного проектирования и анализа в распределенную вычислительную среду. На основе проведенных исследований была предложена концепция распределенного виртуального испытательного стенда, обеспечивающая проблемно-ориентированный подход к решению конкретных классов задач инженерного проектирования посредством ресурсов, предоставляемых вычислительными грид-средами. Была предложена технология CAEBeans, в соответствии с которой, выделяются четыре слоя архитектуры РаВИС, каждый из которых представляется своей оболочкой CAEBeans: Концептуальный слой (проблемный CAEBean), Логический слой (потоковый CAEBean), Физический слой (компонентный CAEBean), Системный слой (системный CAEBean). Разработан прототип комплекса программных средств «Система CAEBeans», обеспечивающий поддержку разработки и исполнения РаВИС. В состав системы входят компоненты: CAEBeans Constructor, CAEBeans Portal, CAEBeans Server, CAEBeans Broker, САЕ-ресурсы. На основе разработанного прототипа произведено испытание системы посредством разработки виртуальных испытательных стендов, ориентированных на решение задач инженерного моделирования на базе ряда наиболее распространенных пакетов инженерного моделирования.

Литература

1. Астафьев А.С. и др. Научная сервис-ориентированная среда на основе технологий Web и распределенных вычислений. // Научный сервис в сети Интернет: масштабируемость, параллельность, эффективность: Труды Всероссийской суперкомпьютерной конференции (21-26 сентября 2009 г., г. Новороссийск). – М.: Изд-во МГУ, 2009. с. 463-467.
2. Бегунов А.А. Применение результатов моделирования для оптимизации и управления технологическими процессами // Параллельные вычислительные технологии: тр. Междунар. науч. конф. (28 янв. – 1 февр. 2008 г., г. Санкт-Петербург). Челябинск: Изд. ЮУрГУ. 2008. С. 31-38.
3. Дорохов В.А., Маковецкий А.Н., Соколинский Л.Б. Разработка проблемно-ориентированной GRID-оболочки для решения задачи овализации труб при закалке // Параллельные вычислительные технологии: Труды международной научной конференции (28 января - 1 февраля 2008 г., г. Санкт-Петербург). -Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. -2008. С. 520.
4. Дорохов В.А. Разработка виртуального испытательного грид-стенда для исследования эффекта овализации труб при термической обработке // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. С. 457-462.
5. Лёушкин В.В., Соколинский Л.Б., Чайко К.А., Юрков В.В. Разработка проблемно-ориентированной Grid-оболочки для моделирования резьбовых соединений труб для нефтяных скважин в распределенных вычислительных средах // Параллельные вычислительные технологии: Труды международной научной конференции (28 января - 1 февраля 2008 г., г. Санкт-Петербург). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2008. С. 534.
6. Марьин С.В., Ковальчук С.В. Сервисно-ориентированная распределенная среда управления прикладными вычислительными пакетами // Сборник статей участников Всероссийского конкурса научных работ студентов и аспирантов «Телематика’2010: телекоммуникации, веб-технологии, суперкомпьютинг» / СПбГУ ИТМО. СПб, 2010. С. 205-206.
7. Насибулина Р.С. и др. Методы организации программных интерфейсов к инженерным пакетам в среде GPE // Параллельные вычислительные технологии: Труды международной научной конференции (28 января - 1 февраля 2008 г., г. Санкт-Петербург). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. С. 537.
8. Радченко Г.И., Соколинский Л.Б., Шамакина А.В. Разработка компонентно-ориентированных CAEBean-оболочек для пакета ANSYS CFX // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2008): Труды международной научной конференции (28 января - 1 февраля 2008 г., г. Санкт-Петербург). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. С. 438-443.
9. Радченко Г.И., Соколинский Л.Б. Технология построения виртуальных испытательных стендов в распределенных вычислительных средах // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. № 54. 2008. С. 134-139.
10. Радченко Г.И. Грид-система CAEBeans: интеграция ресурсов инженерных пакетов в распределенные вычислительные среды // Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2009): Труды международной научной конференции (Нижний Новгород, 30 марта - 3 апреля 2009 г.). Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. С. 281-292.
11. Радченко Г.И. Технология построения проблемно-ориентированных иерархических оболочек над инженерными пакетами в грид-средах // Системы управления и информационные технологии. № 4(34). 2008. С. 57-61.
12. Buriola T.M., Scheer S. CAD and CAE Integration Through Scientific Visualization Techniques for Illumination Design // Tsinghua Science & Technology. Vol. 13, No. 1. 2008. P. 26-33.

13. Fan L.Q. et al. Development of a distributed collaborative design framework within peer-to-peer environment. // Computer-Aided Design. Vol. 40. 2008. P. 891–904.
14. Foster I., Kesselman C. The Grid 2, Second Edition: Blueprint for a New Computing Infrastructure. San Francisco: Morgan Kaufman: 2003, 748 p.
15. Hayes B. Cloud computing // Communication of the ACM. Vol. 51. Issue 7. 2008. P. 9-11.
16. Li Z. et al. Architecture of collaborative design grid and its application based on LAN // Advances in Engineering Software. Vol. 38, № 2. 2007. P. 121-132.
17. Li Z. et al. Conception and implementation of a collaborative manufacturing grid // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 34, № 11-12. 2007. P. 1224-1235.
18. Raphael B., Smith I.F.C. Fundamentals of computer aided engineering. John Wiley, 2003. 306 p.
19. Yin J.W., Zhang W.Y., Li Y., Chen H.W. A peer-to-peer-based multi-agent framework for decentralized grid workflow management in collaborative design. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 41, № 3-4. 2009. P. 407-420.