

СОЗДАНИЕ СРЕДСТВ РАЗРАБОТКИ РАСЧЕТНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ С ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

А.В. Осипов

Развитие ядерной энергетики направляется федеральной целевой программой (ФЦП) «Ядерные энерготехнологии нового поколения» на 2010–2020 годы. Целью ФЦП является создание новой технологической платформы ядерной энергетики на базе замкнутого ядерного топливного цикла с быстрыми реакторами.

Частью ФЦП является подпрограмма «Разработка расчетных интегрированных систем кодов нового поколения для анализа и обоснования безопасности перспективных атомных электростанций и ядерного топливного цикла».

Следует заметить, что цикл обновления кодов для задач анализа и обоснования безопасности АЭС и расчетной поддержки конструирования и проектирования составляет 10-15 лет. Смена поколений вызвана следующими факторами: появление новых данных и моделей; развитие новых вычислительных алгоритмов, технологий и техники; новые требования к разработке проектов и обоснованию их безопасности. За предыдущие 30 лет сменилось два поколения кодов: от упрощенных инженерных до кодов улучшенной оценки и интегральных сквозных кодов.

В ближайшие 10 лет предстоит радикальное обновление кодов с переходом к реалистичному моделированию на основе многомерности, новых вычислительных алгоритмов, суперкомпьютеров и т.п.

Одним из планируемых результатов первого этапа ФЦП (2010 - 2014 годы) должны быть технические решения и разработаны технические проекты реакторов на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (реакторы СВБР).

Важным этапом этих работ является выполнение теплогидравлических расчетов стационарных режимов, а также переходных (нормальных и аварийных) режимов эксплуатации. Для реакторов СВБР используется теплогидравлический расчетный код TRIANA, предназначенный для расчета полей скоростей, температуры, давления теплоносителя в контурах реакторной установки.

Существенным недостатком, затрудняющим эффективную эксплуатацию расчетного кода TRIANA, является отсутствие современного системного обеспечения, необходимого для обслуживания расчетного кода от построения математической (расчетной) модели до анализа и визуализации результатов расчета.

Актуальность разработки такого системного обеспечения во многом обуславливается тем, что в настоящее время выполняются работы по распараллеливанию кода TRIANA, что вызывает необходимость в средствах для работы с более точными и сложными расчетными моделями.

Первым этапом работы является создания средств разработки расчетных моделей. Визуальное представление расчетных моделей должно стать основой интерфейсов, используемых пользователем на всех этапах работы с задачей.

Существующие в настоящее время теплогидравлические расчетные коды с развитым системным обеспечением не позволяют в полной мере осуществлять расчет реакторных установок с жидкометаллическим (свинцово-висмутовым) теплоносителем, так как они разрабатывались в первую очередь для моделирования реакторов с водяным теплоносителем, и поэтому используемые в них расчетные модели не позволяют отразить особенности, ключевые для реакторов СВБР.

Кроме того, системы кодов для анализа и обоснования безопасности реакторных установок являются весьма чувствительными с точки зрения независимости от конкурентов, ограничения лицензионных прав, возможностей их модернизации и интеграции, более жестких требований в части их соответствия современным требованиям обоснования безопасности.

1. Обзор системного обеспечения теплогидравлических расчетных кодов

Для анализа выберем наиболее известные и широко используемые расчетные коды.

1.1 RGUI – интерфейс RELAP5-3D

В 1995 году US Nuclear Regulatory постановило, что все ее программные продукты, включая RELAP5, должны обладать графическими интерфейсами (GUI). В соответствии с этим решением, INEEL (Idaho National Engineering and Environmental Laboratory) совместно с US Department of Energy начали в 1997 году разработку RGUI – графического интерфейса для RELAP5 [1].

Основным элементом RGUI является окно, называемое «RELAP5-3D Station» [2], которое обеспечивает пользователю возможность управления системой RELAP5-3D либо через меню, либо через командную строку:

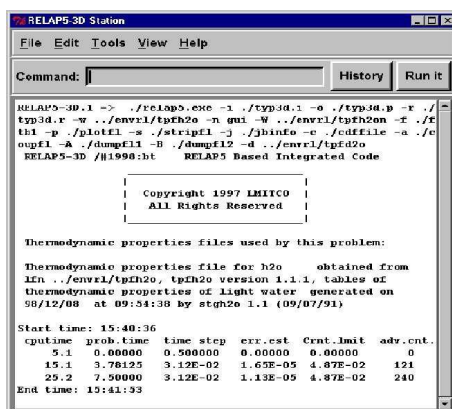


Рис. 1

Пользователь может получить изометрическую гидродинамическую схему установки. Схема строится автоматически из входных данных:

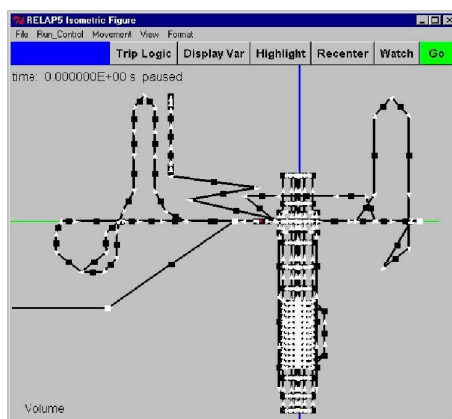


Рис. 2

Графическое представление схемы предоставляет аналитику следующие возможности:

1. автоматическая генерация схемы полезна в тех случаях, когда аналитик имеет в распоряжении входной файл без сопутствующей нодализационной диаграммы;
2. гидродинамическая информация из входного файла может индцироваться на схеме рядом с соответствующими контрольными объемами и узлами без необходимости поиска во входном файле;
3. визуализация трехмерной входной модели облегчает поиск ошибок в позициях, связях, ориентации и других геометрических данных.

Следующая версия интерфейса (RGUI 1.2 [3]) предоставила новые возможности:

2. трехмерное представление труб модели установки;
3. получение графиков методом «point-and-click plot»;
4. динамические цветные карты для показа значений переменных.

Интерфейс предоставляет возможность каркасного или сплошного трехмерного представления труб с подсветкой и теневыми эффектами. Такое представление модели установки является более реалистичным и более легким для понимания:

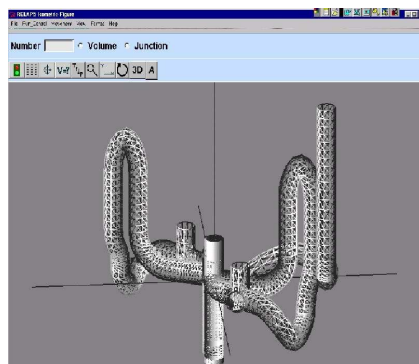


Рис. 3

Возможен показ значений переменных на каждом сегменте трубы с помощью цветовой карты или численных значений.

Технология «point and click plot» заключается в следующем. Пользователь указывает мышью

интересующий его контрольный объем или соединение. Затем выбирает из списка интересующую его переменную и получает график формата «почтовой марки». Затем этот график можно переместить в другое место, изменить его размер и т.п.

Технология «*self-renewing plot*» обеспечивает возможность динамического изменения графика по мере выполнения счета, используя новые доступные данные.

Все эти возможности иллюстрируются на следующем скриншоте:

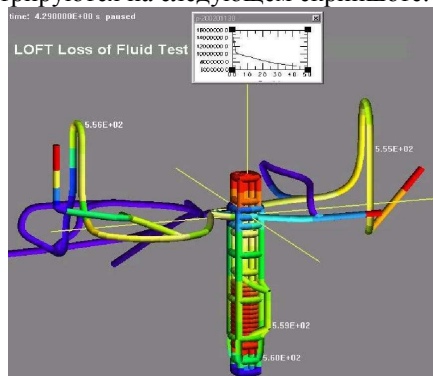


Рис. 4

Начиная с версии 1.5 [4] интерфейс RGUI позволяет работать с тепловыми структурами («тепловая структура» является моделью элемента конструкции, через который происходит теплообмен). Описание тепловой структуры читается из входного файла и визуализируется в виде двумерной решетки, где каждый прямоугольник соответствует отдельной расчетной ячейке.

Цветовая окраска прямоугольников позволяет индцировать значения переменных, связанных с расчетными ячейками:

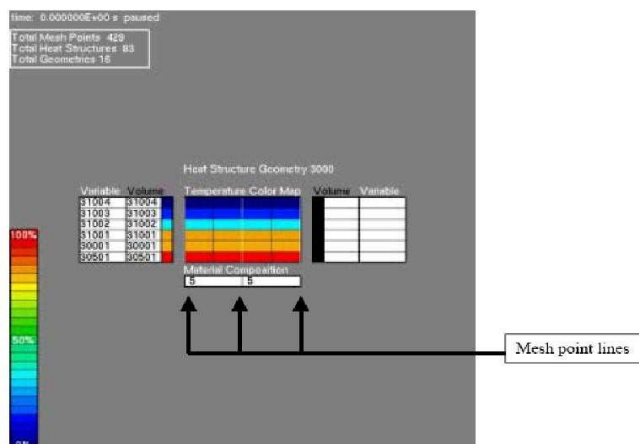


Рис. 5

На скриншоте слева и справа от тепловой структуры находятся колонки, предоставляющие информацию о граничных условиях. Индцируются номера контрольных объемов (граничащих с ячейками тепловой структуры), граничная температура, а также любой иной граничный параметр по выбору пользователя.

В версии 1.5 появилась возможность автоматической генерации входного файла для RELAP5. Для этого была использована программа Engineering Code Pre-Processor (ECP) от компании Computer Simulation Analysis (CSA).

Следует также отметить инкорпорирование в интерфейс ряда инструментов, используемых для анализа реакторных установок: ATR (Advanced Test Reactor), SCDAP-3D (разработка группы INEEL Severe Accident Core Damage) и т.п.

1.2 GUIHARE – интерфейс CATHARE

Расчетный код CATHARE (Code for Analysis of THERmalhydraulics during an Accident of Reactor and safety Evaluation) разработан для моделирования водо-водяных ядерных реакторов (PWR). Код является результатом совместных усилий ряда французских организаций: Комиссии по атомной энергии CEA (Commissariat à l'énergie atomique) (www.cea.fr), Института Ядерной безопасности IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire) (www.irsn.org), группы компаний EDF (Electricité De France), корпорации AREVA (один из лидеров мировой ядерной индустрии).

Система GUIHARE (Graphic User Interface for CATHARE) [5] является интерфейсом расчетного кода CATHARE и используется для:

- создания и верификации новых или старых файлов исходных данных;
- управления работой расчетного кода;
- анализа результатов вычислений.

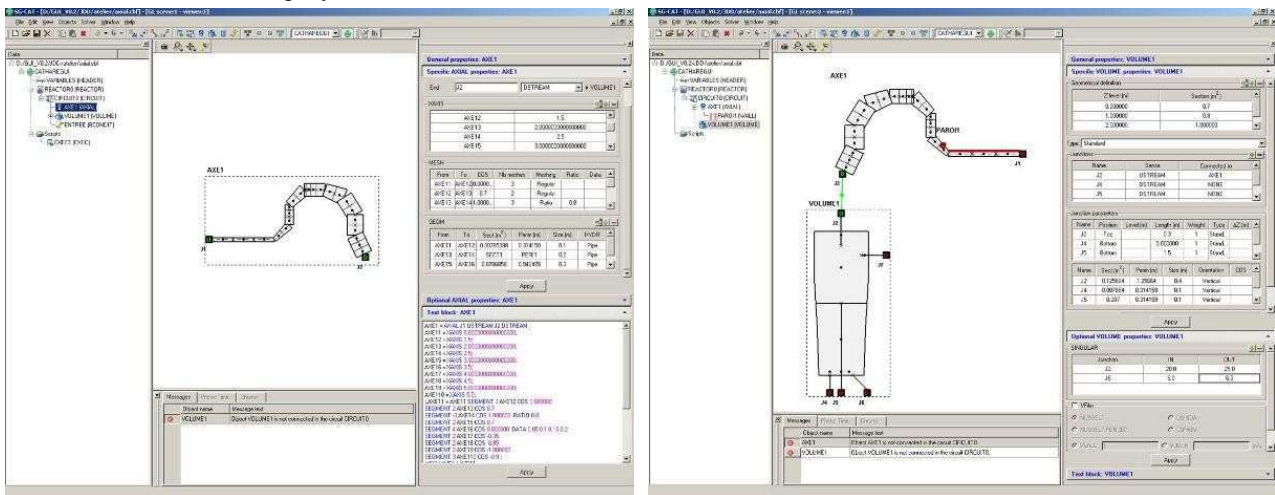


Рис. 6 Примеры панелей GUTHARE на этапе подготовки расчетной модели

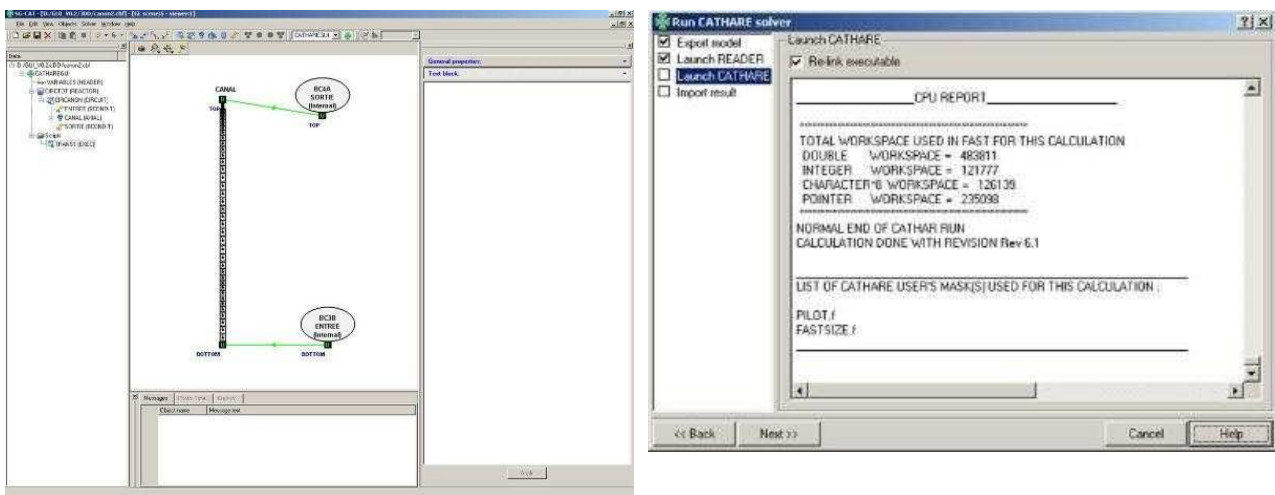


Рис. 7 Примеры панелей GUTHARE на этапе выполнения расчетов

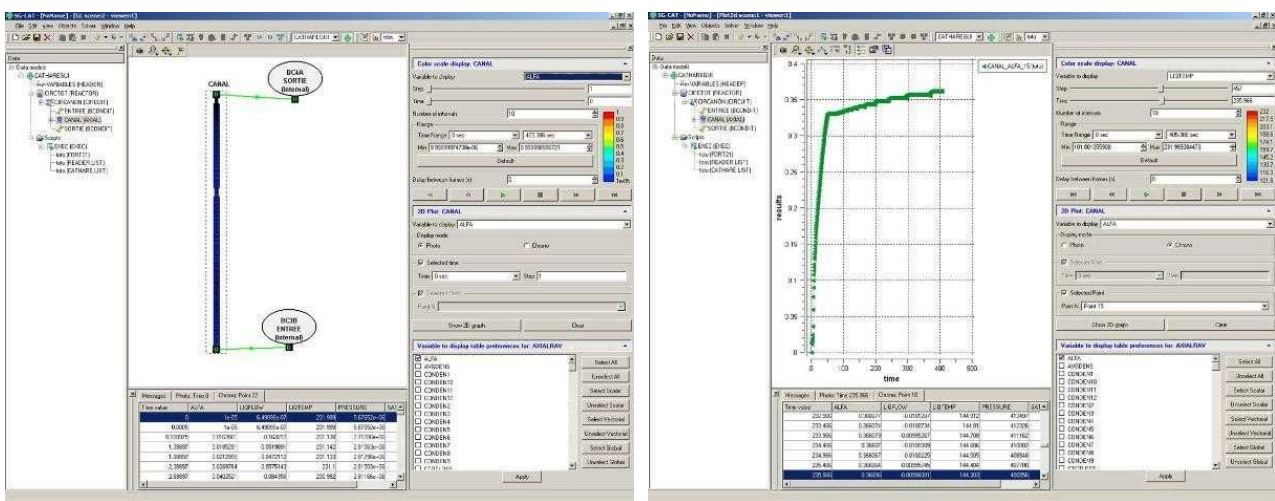


Рис. 8 Примеры панелей GUTHARE на этапе анализа результатов

1.3 ATHLET Program Package

Теплогидравлический код ATHLET (Analysis of Thermal-hydraulics of LEaks and Transients) [6] предназначен для анализа переходных процессов в установках, утечек, а так же больших поломок легководных реакторов. Код применим как для западных типов реакторов (PWR и BWR), так и для российских реакторов типа ВВЭР и РБМК.

Код разработан в Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) – ведущей немецкой организации в области ядерной безопасности и утилизации радиоактивных отходов. Разработка и тестирование ATHLET проводится при финансовой поддержке Федерального министерства экономики и технологии Германии.

Системное обеспечение расчетного кода ATHLET называется «ATHLET Program Package» [7]. Оно состоит из набора программ, предназначенных для поддержки как пользователей кода ATHLET, так и разработчиков самого кода.

Для работы с «ATHLET Program Package» пользователь использует диалоговую панель, с помощью которой он вызывает необходимые инструменты:

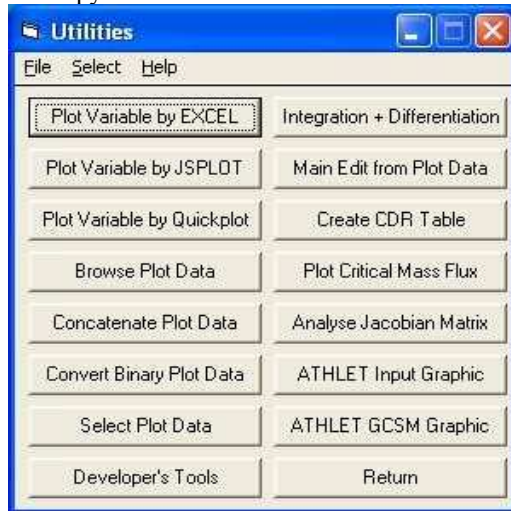
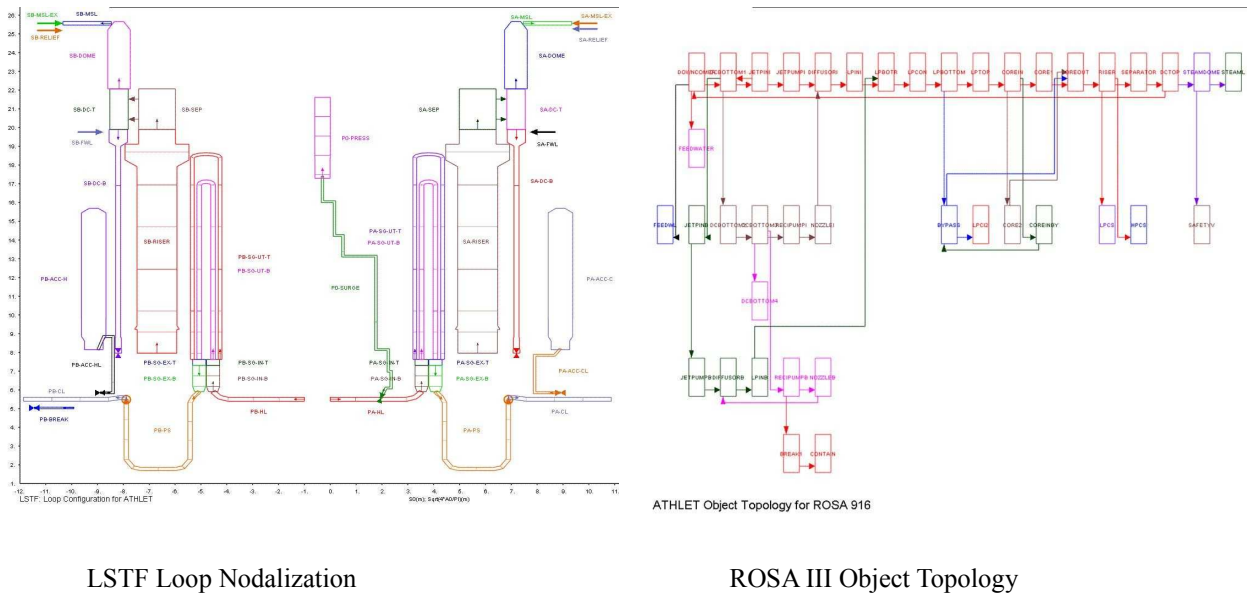


Рис. 9

Далее приведено описание некоторых компонент системного обеспечения расчетного кода.

Компонент «ATHLET Input Graphics Program» (AIG) создает графическое представление входного набора данных. Это обеспечивает поддержку процессу изучения и документирования геометрии модели и нодализационных схем, описанных входными данными. Кроме того, входные графы могут быть использованы для динамической визуализации результатов работы кода ATHLET с помощью инструментов Analysis Simulator ATLAS или инструмента пост-процессинга ATLAS-DyVis.

Примеры графического представления нодализационной и топологической схем:



LSTF Loop Nodalization

ROSA III Object Topology

Рис. 10

В качестве графической программы используется JSPLLOT - мощная и гибкая программа, работающая

на всех основных компьютерных платформах. Ниже представлена диалоговая панель управления построением графиков:

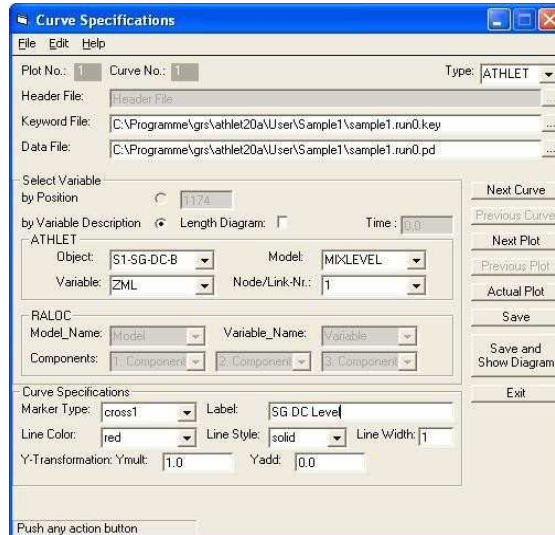


Рис. 11

Инструмент «ATLAS-DyVis» (Dynamic Visualization) является графическим модулем системы ATLAS Analysis Simulator. Он может использоваться для представления результатов, полученных моделирующими программами подобными ATHLET (теплогидравлика, теплопроводность, управление). Его главное назначение – показ развития процесса моделирования посредством динамической визуализации данных с помощью анимации. Выбранные физические величины отображаются как градуированные цвета, заполняющие элементы нодализационных схем.

Ниже представлены примеры использования инструмента при работе с нодализационной схемой:

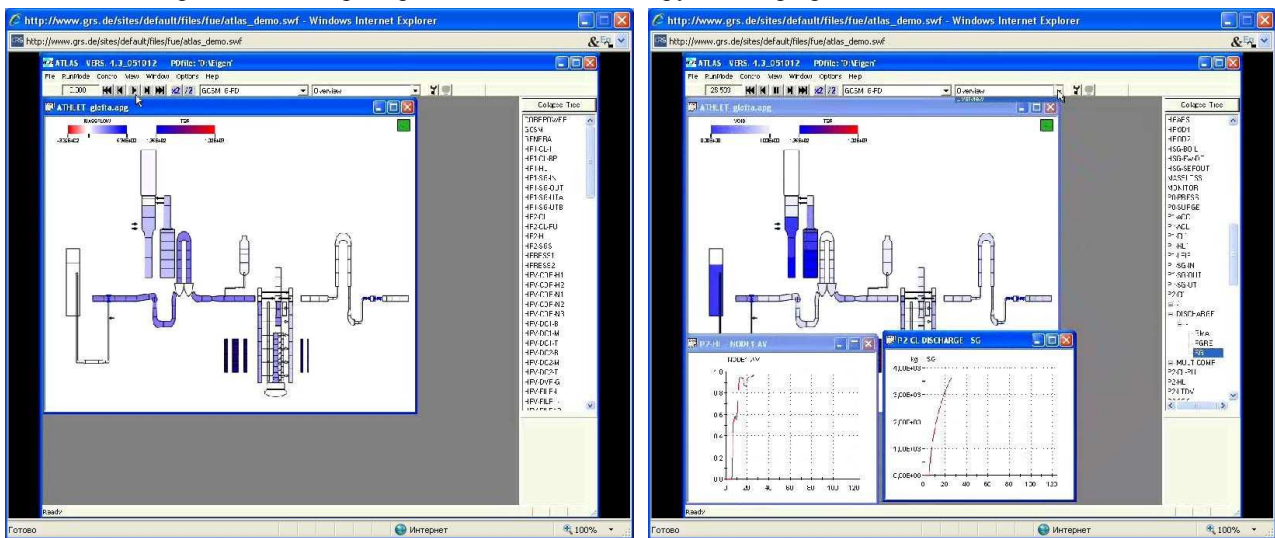


Рис. 12

1.4 Графический интерфейс ПК СОКРАТ

Для анализа тяжелых аварий с потерей теплоносителя в ИБРАЭ РАН в кооперации с ВНИИЭФ, РНЦ «Курчатовский Институт», СПБАЭП и АЭП создан программный комплекс улучшенной оценки СОКРАТ [8]. В данном программном комплексе обеспечивается сквозное моделирование физических процессов на всех этапах развития аварийного процесса: от исходного события до выхода расплава за пределы корпуса реактора с учетом конструктивных особенностей ВВЭР.

Модуль поддержки расчетного кода СОКРАТ, а также библиотека блоков для создания расчетных моделей входят в состав программного комплекса (ПК) МВТУ-4. На следующем скриншоте приведен вид панели инструментов ПК:

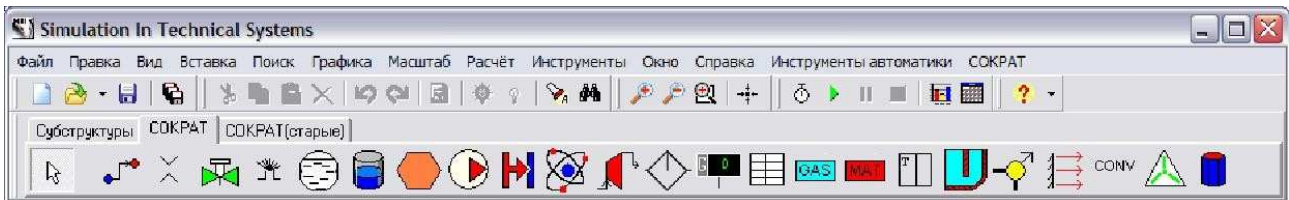


Рис. 13

Создание математической модели объекта в графической среде ПК MBTY-4 происходит путем визуальной компоновки нодализационной схемы из простых расчетных элементов, соединенных между собой линиями связи. На следующем изображении приведен общий вид расчетной схемы петли РУ ВВЭР-1000:

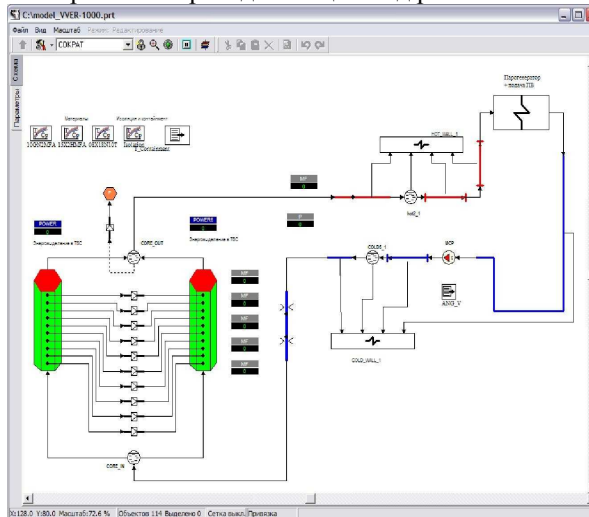


Рис. 14

На схеме присутствуют датчики и блоки описания свойств различных материалов. В общем случае внутри субмоделей располагаются как отдельные элементы, так и схемы целых систем. Отметим принципиальную возможность неограниченного усложнения модели путем добавления новых элементов и уточнения существующих упрощенных частей.

Интерфейс позволяет сгенерировать текстовый файл, который передается в код СОКРАТ для расчета.

1.5 Выводы

Во всех рассмотренных случаях системное обеспечение является надстройкой над расчетным кодом, предоставляющей различные сервисы на различных этапах работы с задачей. Доминирующим архитектурным (и дизайнерским) решением является организация системного обеспечения в виде комплекса независимых инструментов, управление которыми централизовано единым интерфейсом (иногда представленным одной панелью с кнопками вызова отдельных инструментов).

На всех этапах работы с задачей пользователь опирается на визуальное представление нодализационной или топологической схемы установки. Схема используется для поиска ошибок во входных данных, а также для организации доступа к текущим значениям переменных, связанных с теми или иными элементами схемы. Возможности доступа варьируются от получения текущего численного значения переменной в конкретном контрольном объеме до анимированного представления всей схемы, на которой цветом индицируются значения переменной.

Отметим также, что все рассмотренные коды разрабатывались для расчета реакторных установок с водяным теплоносителем.

2. Постановка задачи

Задача состоит в разработке системного обеспечения расчетного кода, используемого для моделирования теплогидравлических процессов в ядерных реакторах с жидкометаллическим теплоносителем. Системное обеспечение должно предоставлять пользователю полный набор сервисов на всех этапах работы с задачей.

Первым этапом разработки системного обеспечения является создания средств конструирования расчетных моделей теплогидравлики ядерных реакторов. Расчетная модель должна стать «инфраструктурной» основой всех компонент разрабатываемой системной среды.

Расчетная теплогидравлическая модель графически представляется с помощью нодализационных схем. Ниже представлен фрагмент нодализационной схемы первого контура реакторной установки:

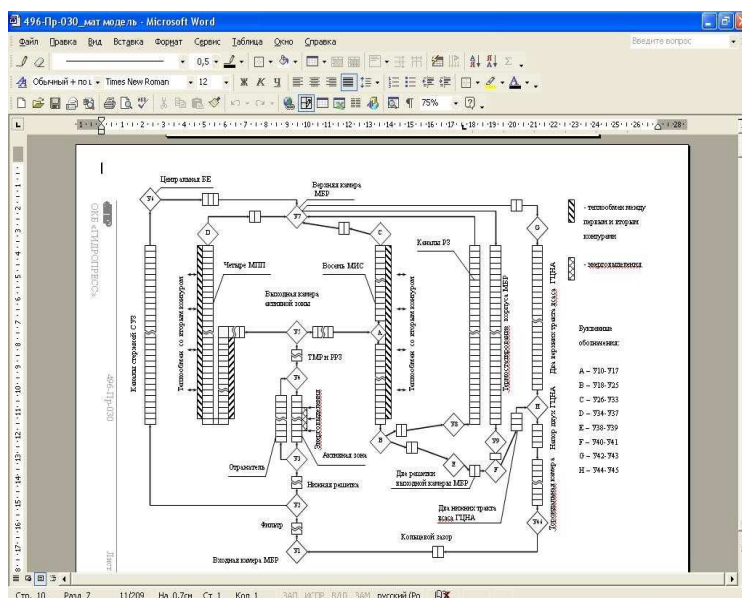


Рис. 15

Нодализационная схема описывается файлом входных данных для расчетного кода. Каждому элементу схемы присписываются значения множества различных параметров (геометрические размеры, тип жидкости, энтальпия, начальное давление и т.п.). Ниже приведен фрагмент входного файла, соответствующего данной схеме:

```

/* расчетная схема СВБР-100
.....
NTR 4270
IFST 4201
KTIP PLEN, PLEN, PLEN, PLEN, PLEN,
.....
KLIQ 46(PBBI), 24(H2O)
KGAS 70(HE)
V0 0.78035, 0.24136, 0.31235, 0.34359, 0.54661,
.....
SS2 3.698361, 2.83958, 2.83958, 2.83958, 2.67946,
.....

```

Такая процедура построения расчетной модели обладает большой трудоемкостью и чревата высокой вероятностью внесения трудно обнаружимых ошибок. По словам пользователей, создание расчетной модели занимает порядка трех месяцев, в то время как проведение расчетов по ней – меньше месяца.

Для решения поставленной задачи предполагается использовать следующий подход:

- на всех этапах работы с задачей пользователь опирается на единую расчетную модель;
- расчетная модель предоставляется пользователю в графическом виде;
- подготовка исходных данных представляет собой процесс интерактивного построения графического представления расчетной модели;
- графическое представление расчетной модели используется для доступа к промежуточным и результирующим данным: выбор графического объекта, представляющего некоторый элемент модели, позволяет получить доступ к любым данным, связанным с этим элементом.

3. Реализация Конструктора расчетной модели

Опишем возможности Конструктора, не углубляясь в достаточно разнообразные функциональные возможности.

3.1 Основные операции построения схемы

Нодализационная схема строится из следующих типов объектов:

1. узел (node) – особый элемент схемы (вентиль, разветвление и т.п.);
2. связь (junction) – элемент, определяющий топологию схемы и направление движения жидкостей;
3. труба (pipe) – элемент, представляющий трубопровод;

4. контрольный объем (control volume) – фрагмент трубопровода, описываемый отдельным набором параметров;
5. тепловая структура (heat structure) – элемент, описывающий теплообменник (и вообще процесс теплового обмена);
6. мультиузел (multinode) – элемент, представляющий множество однотипных узлов.

Пользователь выполняет функцию создания необходимого элемента схемы (узла, связи, трубы и т.п.) и указывает мышкой положение данного элемента на экране.

Ниже представлен скриншот, на котором созданы шесть узлов, связи между ними и на одной из связей построена труба:

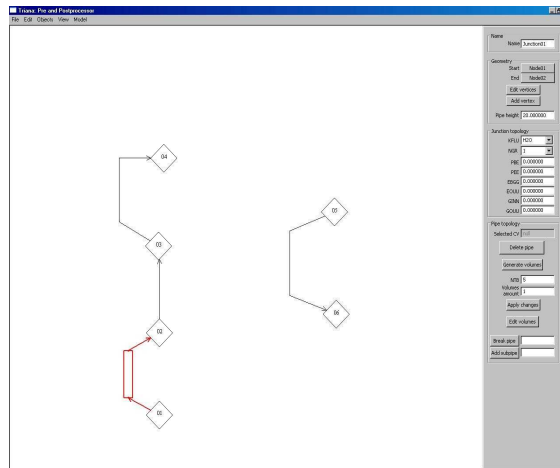


Рис. 16

Панель у правого угла экрана индицирует основные параметры выделенного элемента схемы. Можно вызвать вспомогательные панели, позволяющие определить дополнительные параметры элемента. Так, например, выглядят панели параметров узла и параметров контрольных объемов трубы:

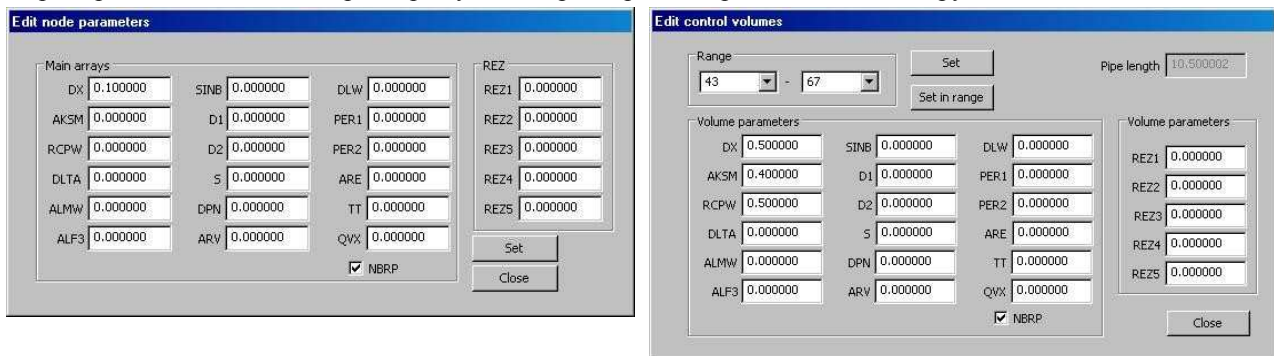


Рис. 17

Разбивать трубу на контрольные объемы можно либо вручную, указывая геометрические размеры каждого фрагмента (диапазона фрагментов), либо предложить системе сделать это самостоятельно, указав несколько базовых параметров такого разбиения.

Конструктор позволяет пользователю в любой момент перестраивать представление схемы (перемещая узлы, перемещая точки излома, строя новые точки излома и т.д.), а также менять саму модель (разбивать трубу на части, вставлять новые узлы, удалять элементы, менять количество контрольных объемов и т.д.).

Конструктор предоставляет пользователю возможность копирования и вставки элементов схемы – узлов, связей, труб и тепловых структур.

3.2 Построение тепловых структур

Построение тепловых структур является более сложной операцией. Во-первых, она состоит из двух компонент – части, которая выделяет тепло, и части, которая это тепло поглощает (внутренняя и внешняя части тепловой структуры). Во-вторых, тепловая структура имеет продольную модель и радиальную модель.

Ниже приведены скриншот, на котором изображена продольная модель тепловой структуры (внутренняя и внешняя части структуры «приписаны» разным трубам), и скриншот панели, с помощью которой описывается радиальная модель структуры:

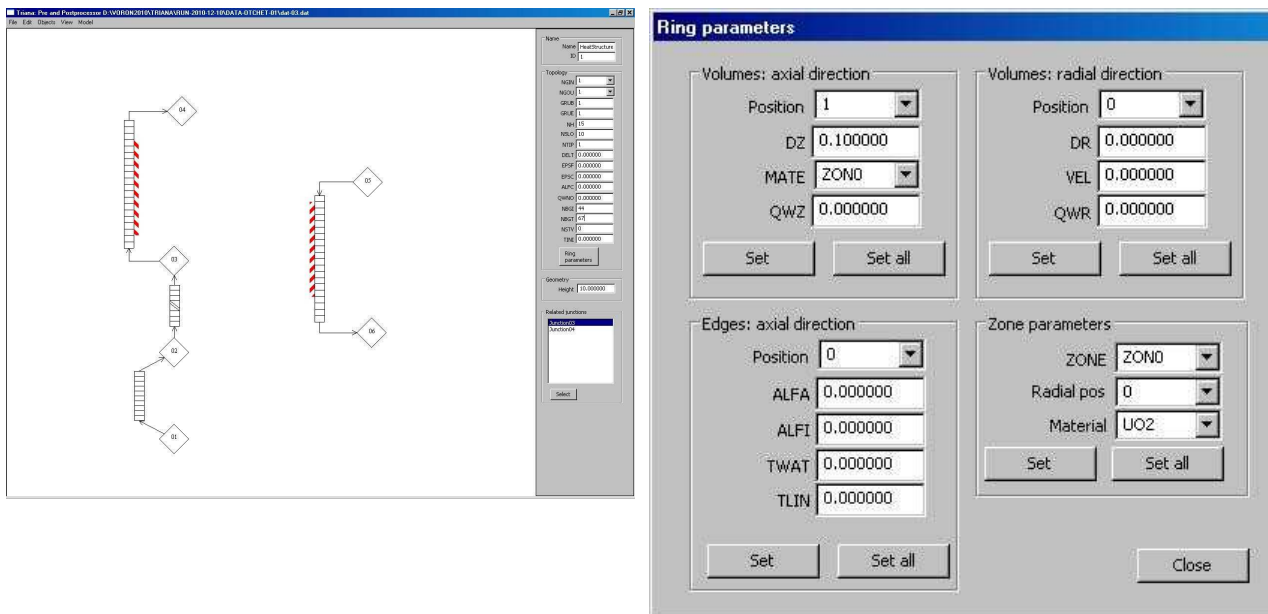


Рис. 18

3.3 Построение мультиузлов

Мультиузел является алиасом набора узлов. Такая возможность удобна для представления наборов однотипных узлов, позволяя упростить визуальное восприятие нодализационной схемы.

Сложность при построении мультиузлов состоит в проведении связей между ними: каждый узел из состава мультиузла может быть соединен с любым другим узлом из состава другого мультиузла или отдельного узла. Предусмотрен целый ряд функций, упрощающих эту работу, включая возможность копирования и репликации построенных связей.

Пользователь имеет возможность включать отдельные узлы в состав мультиузлов и, наоборот, выводить какие-то узлы из состава мультиузлов.

3.4 Верификация параметров схемы

Пусть нодализационная схема расчетной модели построена и заданы параметры элементов схемы:

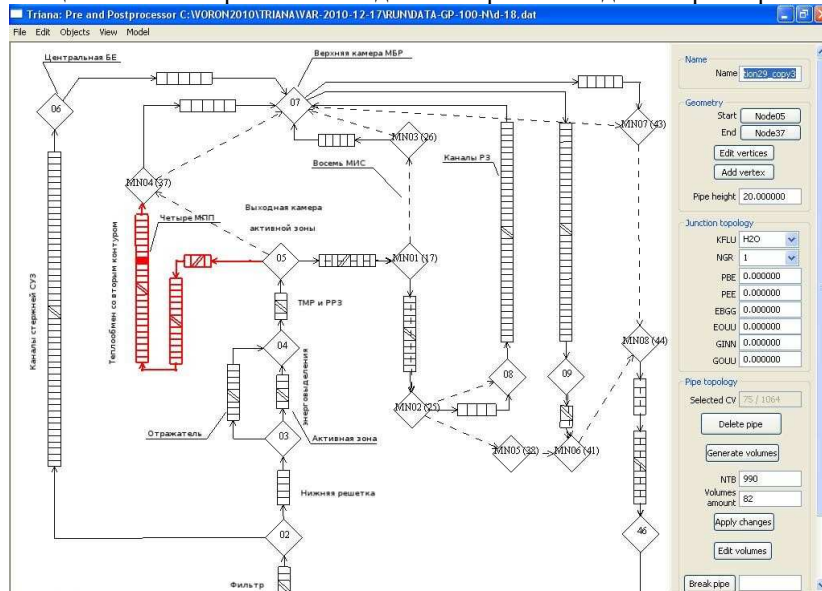


Рис. 19

Пользователь должен проверить корректность модели. Верификация модели состоит в выполнении множества проверок параметров текущей модели на их допустимость и соответствие друг другу. Результаты верификации записываются в файл и предъявляются пользователю. Примеры проверок:

- сумма длин контрольных объемов, к которым примыкает одна сторона тепловой структуры,

должна равняться сумме длин контрольных объемов, к которым примыкает другая сторона этой структуры;

- сумма произведений длин контрольных объемов на синусы угла наклона оси канала должны равняться нулю по всем замкнутым контурам.

3.5 Сохранение и чтение схемы

Построенная нодализационная схема имеет два аспекта: содержательный (определяемый информацией, являющейся входными данными расчетного кода TRIANA) и презентационный (определяемый информацией, описывающей представление схемы на экране).

Эти два типа информации сохраняются в двух разных файлах: содержательная информация сохраняется в dat-файле (входной файл для кода TRIANA), а презентационная сохраняется в xml-файле.

При чтении данных можно выбрать либо dat-файл, либо xml-файл. Если открыть dat-файл, то визуальное представление система выполнит по своему разумению. Если открыть xml-файл, то система из xml-файла прочитает информацию о визуальном представлении схемы.

4. Средства анализа и визуализации данных

Загрузим в Конструктор нодализационную схему, по которой выполнялся (выполняется) счет, и выполним функцию «Open Data Base». На экране появится панель, индицирующая содержимое бинарной Базы данных.

В качестве примера доступа к данным приведем реализацию технологии «point-and-click plot». Пользователь указал мышкой интересующий его элемент схемы (на схеме - контрольный объем, выделенный красным цветом) и интересующую его переменную (на панели Базы данных).

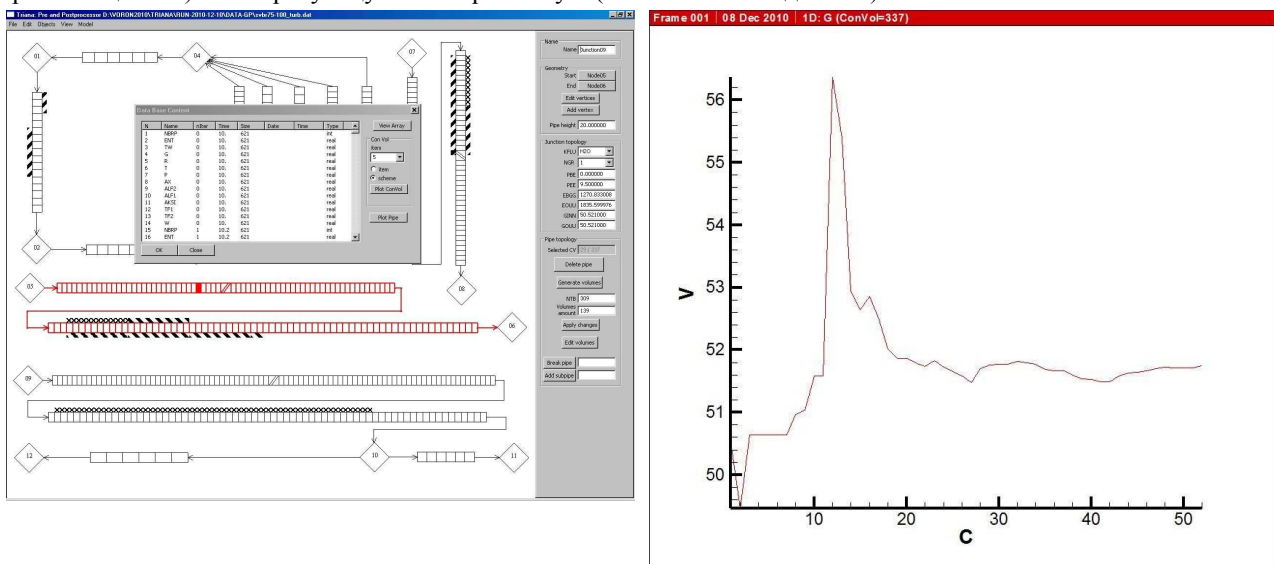


Рис. 20

Конструктор вызывает графическую систему (Tecplot), в окне которой строится график изменения по времени указанной переменной (давление, температура и т.п.), связанной с указанным контрольным объемом.

Заключение

Работа посвящена вопросам создания системного обеспечения расчетного кода, предназначенного для выполнения теплогидравлических расчетов реакторных установок с жидкометаллическим (свинцово-висмутовым) теплоносителем. Системное обеспечение необходимо для обеспечения полного комплекса обслуживания расчетного кода: от построения расчетной модели до анализа и визуализации результатов расчета.

В работе приводится обзор интерфейсов наиболее известных расчетных теплогидравлических кодов.

Приводятся постановка задачи, определяются цели первого этапа разработки системного обеспечения – создание средств конструирования расчетных моделей. Расчетная модель должна стать «инфраструктурной» основой всех компонент разрабатываемой системной среды.

Описываются основные проектные решения и реализация Конструктора расчетных моделей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. G. Mesina, J. Galbraith. «RGUI 1.0, New Graphical User Interface for RELAP5-3D». Proceedings of the

- 7th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-7). Tokyo, Japan, April 19-23, 1999, pp.12. <http://www.inl.gov/technicalpublications/Documents/3314474.pdf>
2. Mesina, G., "The RELAP5 3D Station, a Graphical User Interface". Proceedings of the International RELAP5-3D Users Seminar, College Station, TX, USA, May 17-21, 1998.
 3. G.Mesina, J.Galbraith. New Developments and Value of the RELAP5-3D Graphical User Interface (RGUI 1.2). Proceedings of the RELAP5-3D International User Seminar Jackson Hole, WY, USA, September 12-14, 2000, pp.13. <http://www.inl.gov/relap5/rius/jackson/mesina.pdf>
 4. G. Mesina. Developments and New Directions for the RELAP5-3D Graphical User Interface. Proceedings of the 2001 RELAP5 International Users Seminar. Sun Valley, ID, USA, September 5-7, 2001 AD. <http://www.inel.gov/relap5/rius/sunvalley/mesina.pdf>
 5. CATHARE. <http://www-cathare.cea.fr>
 6. ATHLET Mod 2.2 Cycle A. Program Overview
http://www.grs.de/sites/default/files/fue/ATHLET_Overview.pdf
 7. ATHLET. <http://www.grs.de/en/content/support-software>
 8. COKPAT. <http://www.ibrae.ac.ru/content/view/272/305/>