



Общероссийский математический портал

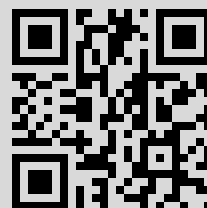
В. В. Беликов, Н. П. Вабищевич, П. Н. Вабищевич, Ю. В. Катыхков, Н. А. Мосунова, База данных по свойствам материалов, *Матем. моделирование*, 2014, том 26, номер 8, 20–30

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 193.233.10.21

16 ноября 2020 г., 20:50:30



УДК 51-74, 519.657, 536.71

БАЗА ДАННЫХ ПО СВОЙСТВАМ МАТЕРИАЛОВ

© 2014 г. *В.В. Беликов, Н.П. Вабищевич, П.Н. Вабищевич, Ю.В. Катыхков, Н.А. Мосунова*

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук
vbel@ibrae.ac.ru, npvab@ibrae.ac.ru, vab@ibrae.ac.ru,

На основе анализа существующих программных продуктов, опыта разработки и использования расчётных кодов по анализу безопасности АЭС сформулированы общие требования к базе данных по свойствам материалов, используемым в атомной энергетике. Разработана архитектура и база данных по свойствам материалов, система управления базой данных с поддержкой дружественного графического интерфейса пользователя. Реализован единый механизм использования базы данных в программных продуктах на основе динамически подключаемых библиотек. В работе представлен обзор основных функциональных возможностей и дано описание ключевых компонентов разработанной базы данных.

Ключевые слова: база данных, свойства материалов, пользовательский графический интерфейс, библиотека функций, атомная энергетика.

MATERIAL PROPERTIES DATABASE

V.V. Belikov, N.P. Vabishchevich, P.N. Vabishchevich, U.V. Katishkov, N.A. Mosunova

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Science (IBRAE RAS)

In the article the requirements to the material properties database, used in atomic energetics, are represented. The requirements are based on the analysis of existing software products, authors experience in the development and use of computer codes for nuclear safety justification. On the base of the formulated requirements the architecture of material properties database and database itself supplied with database management system and graphical user interface have been developed. In addition the united procedure of database use in computer codes in form of dynamic library have been developed. The review of the database features and major components is represented in the article.

Key words: database, material properties, graphical user interface, functions library, computer code, atomic energetics.

Введение

Современные системы инженерного проектирования и моделирования (CAD/CAE системы) относятся к классу общего прикладного программного обеспечения и включают отдельные программные модули для работы с базами данных по свойствам материалов. Пользователь в рамках дружественного пользовательского интерфейса имеет воз-

возможность выбрать нужный материал с теми или иными свойствами для отдельных элементов конструкции и использовать эти свойства при расчетно-теоретическом обосновании своих технических решений.

Исследовательские расчетные программы (коды) как специализированное прикладное программное обеспечение ориентированы на решение более узких задач численного моделирования, но также нуждаются в обеспечении свойствами материалов. Задача создания единой современной базы данных (БД) по свойствам материалов, используемым в атомной энергетике, является важной и актуальной, поскольку данные по теплофизическим, физико-механическим и химическим свойствам материалов являются одними из основополагающих для корректной расчетно-теоретической оценки работоспособности атомных электростанций как в нормальных условиях эксплуатации, так и при авариях.

Задача поиска и оценка данных по свойствам материалов решается при создании любого нового программного комплекса. Особенно важно использование единых значений свойств материалов в программных комплексах, являющихся составной частью интегральных расчетных кодов, обеспечивающих непрерывный автоматизированный расчет последовательности разнородных событий и явлений, характеризующих разные режимы работы моделируемого объекта.

Анализ основных существующих отечественных и зарубежных баз данных, таких как ИВТАНТЕРМО (ОИВТ РАН, Россия) [1], THERPRO (МАГАТЭ) [2], MPDB (Material Property Database, США) [3], Mat/PRO (Paulin Research Group, США) [4], WaterSteamPro (МЭИ (ТУ), Россия) [5] позволяет сделать следующий вывод: до настоящего момента не существует единой отечественной базы данных, которая содержала бы свойства ядерного топлива, теплоносителей, замедлителей и других материалов, используемых в области атомной энергетике. Создание единой БД диктует необходимость разработки системы управления базой данных (СУБД), обладающей дружественным графическим интерфейсом пользователя для редактирования, добавления, поиска, отображения и вывода информации в удобном формате. Необходимо также обеспечить единый механизм использования базы данных в программных продуктах, включая интегральные коды для анализа и обоснования безопасности АЭС.

Цель настоящей работы – сбор, анализ и создание единой базы данных по свойствам материалов, используемым в атомной энергетике, разработка системы управления БД с поддержкой графического интерфейса пользователя в виде самостоятельного программного продукта, обладающей всеми перечисленными выше возможностями, а также создание единого механизма использования БД в программных продуктах в виде динамически подключаемых библиотек расчетных функций.

В работе рассмотрены основные принципы создания базы данных по свойствам материалов, функциональное наполнение и пользовательский графический интерфейс по управлению БД. Приведено также описание библиотек расчетных функций, источником данных для которых является единая БД, а также базовые принципы использования библиотек расчетных функций в расчетных кодах. Первая версия единой базы данных по свойствам материалов и графического интерфейса была разработана в ИБРАЭ РАН в рамках проекта «Создание концепции и технологии «Виртуальная АЭС с ВВЭР».

1. Наполнение базы данных

Свойства материалов для единой БД отбирались после их экспертного анализа и оценки. При сборе информации по свойствам материалов с учетом специализации БД (материалы, используемые в атомной энергетике) использовались следующие принципы:

- свойства должны включать в себя как общепринятые (теплофизические, транспортные, физико-механические, диэлектрические), так и специфические, используемые при моделировании процессов, протекающих на АЭС. Например, выход газообразных продуктов деления, скорость распухания, коэффициент излучения и другие;
- предпочтение отдавалось данным, полученным из организаций, работающих в области атомной энергетики;
- каждое свойство в БД должно содержать ссылку на источник данных;
- свойства воды и пара должны соответствовать последним рекомендациям Международной ассоциации по свойствам воды и пара (IAPWS).

Наполнение базы данных осуществлялось с использованием следующих основных источников:

1. База данных ИБРАЭ РАН, созданная в рамках проекта 3078p совместно с СЕА (The French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, Франция) [9, 10].
2. База данных расчётного кода СОКРАТ [11].
3. THERPRO – база данных Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [2].
4. INSC Material Properties Database – база данных по свойствам материалов Международного центра по ядерной безопасности (International Atomic Safety Center, США) [12].
5. ИВТАНТЕРМО – база данных термодинамических свойств индивидуальных веществ (ОИВТ РАН) [1].
6. MPDB (Material Properties Database, США) – база данных свойств материалов общего назначения [3].
7. Стандарты Международной ассоциации по свойствам воды и пара (IAPWS) от 1997 г. с дополнениями от 2007 г. [6] и созданные на их основы таблицы [7].
8. Другая открытая литература, например, [13–22].

На настоящий момент БД свойств материалов, используемых в области атомной энергетики, содержит 180 материалов и около 2500 свойств. Все материалы разделены на 9 групп:

- неконденсируемые газы;
- замедлители;
- защитные материалы;
- конструкционные материалы;
- поглощающие материалы;
- продукты окисления;
- теплоносители;
- топливо;
- элементы – элементы периодической системы Д. И. Менделеева.

База данных непрерывно пополняется с учетом текущих запросов прикладного математического моделирования. Предусмотрена возможность создания БД пользователя, что позволяет создавать специализированную БД для конкретного расчетного кода и проводить эксперименты с пользовательской БД, не нарушая при этом единую базу данных.

2. Графический интерфейс пользователя

Система управления базой данной выполнена в виде современного графического интерфейса пользователя, обеспечивающего легкий и удобный доступ к БД для просмотра, анализа и выбора нужной информации.

На основе анализа отечественных и зарубежных баз данных [1-7] по свойствам материалов, используемым в области атомной энергетики, а также опыта разработки и применения расчётных кодов для анализа безопасности АЭС, были сформулированы требования к графическому интерфейсу. Интерфейс должен обеспечивать следующие возможности:

- редактирование данных (добавление, удаление и изменение материалов, свойств и данных, представленных в виде формул, таблиц или констант);
- графическое представление зависимости выделенного свойства от аргумента;
- обработка формул анализатором формул (парсером);
- создание таблиц с заданными параметрами и сохранение их в различных форматах;
- импорт таблиц из текстовых документов в базу данных;
- расчет значения текущего свойства с использованием встроенных калькуляторов (быстрая оценка правильности ввода данных);
- графический анализ свойств, взятых из разных источников;
- вывод на печать содержания базы данных с различной степенью детализации, а также создаваемых таблиц, графиков;
- реализация расчета свойств воды в формуляции Международной ассоциации по свойствам воды и пара (IAPWS).

Использование анализатора формул позволяет отказаться в подавляющем большинстве случаев от написания функций для каждого уравнения, описывающего зависимость свойства от аргумента. В качестве парсера выбран свободно распространяемый программный продукт `muParser` [8], обладающий достаточно высокой скоростью обработки данных.

Для хранения и использования БД выбран формат XML (eXtensible Markup Language). Учитывая то обстоятельство, что БД является иерархичной, использование XML позволяет легко извлекать нужные данные с помощью существующих инструментов, например, DOM (Document Object Model). Кроме этого, XML обладает удобным инструментарием для ввода, вывода, экспорта и импорта данных и является универсальным форматом для обмена информацией между различными системами, даже не совместимыми. Структура XML файла базы данных по свойствам материалов показана на рис.1.

Схему базы данных можно разделить на 3 основных уровня иерархии (рис.1). Первый уровень – это уровень материала, содержащий все его необходимые параметры: наименование, уникальный идентификатор в пределах всей базы данных, группа, к которой относится материал, а также комментарий, который содержит, как правило, основные свойства материала при нормальных условиях.

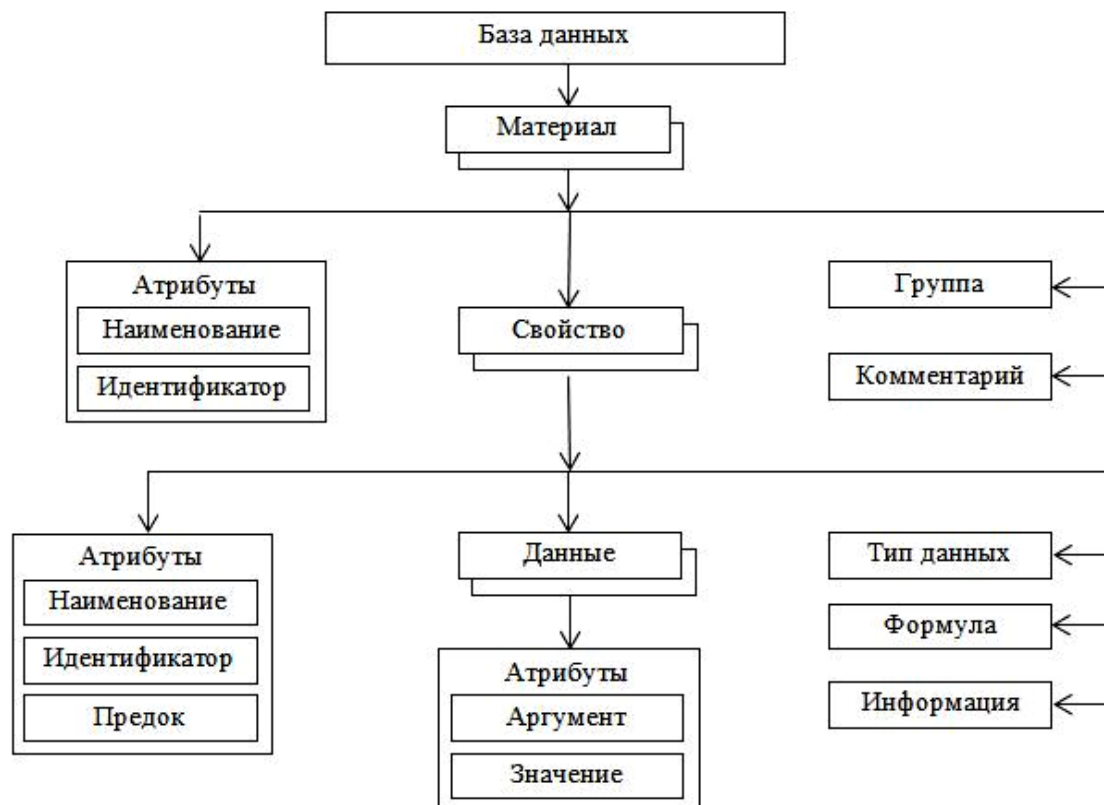


Рис.1. Структура XML файла.

Второй уровень – это уровень свойства, являющийся подуровнем материала. Включает в себя такие сведения по свойству, как наименование, идентификатор, уникальный в пределах таблицы свойств текущего материала, тип данных (таблица или формула), а также формульная зависимость текущего свойства от аргумента(ов) в формате анализатора формул. Кроме этого, уровень свойства содержит ссылку на идентификатор материала, что позволяет легко находить нужный узел свойства в XML файле с помощью существующих инструментов, например, DOM (Document Object Model), а также краткую информацию по текущему свойству, обязательно включающую источник данных.

Третий уровень – уровень данных, являющийся подуровнем свойства. Он содержит всего два параметра и предназначен для хранения данных по текущему свойству. Для таблиц такими данными являются значение аргумента и значение свойства, для формул – формальное представление и значения коэффициентов в уравнении.

Графический интерфейс пользователя базы данных написан на языке C# с использованием специализированных компонент, которые обладают широким набором функций для работы с таблицами и БД. Главное окно программы (рис.2) содержит следующие компоненты:

- заголовок с указанием загруженного XML файла с базой данных;
- основное меню;
- панель инструментов;
- рабочая область, в которую выводится многоуровневая таблица единой базы данных;

- навигатор, предназначенный для управления записями БД: перемещение, вставка/удаление строки в текущей таблице, вход/выход из режима редактирования.

Рабочая область представляет собой серию вложенных друг в друга таблиц, соответствующих выбранной схеме (рис.2):

- таблица материалов – главная таблица, содержащая характеристику текущего материала;
- таблица свойств является вложенной по отношению к главной таблице текущего материала и включает в себя параметры свойства;
- таблица данных является вложенной по отношению к таблице свойств и служит для ввода как табличных данных, так и данных для формул.

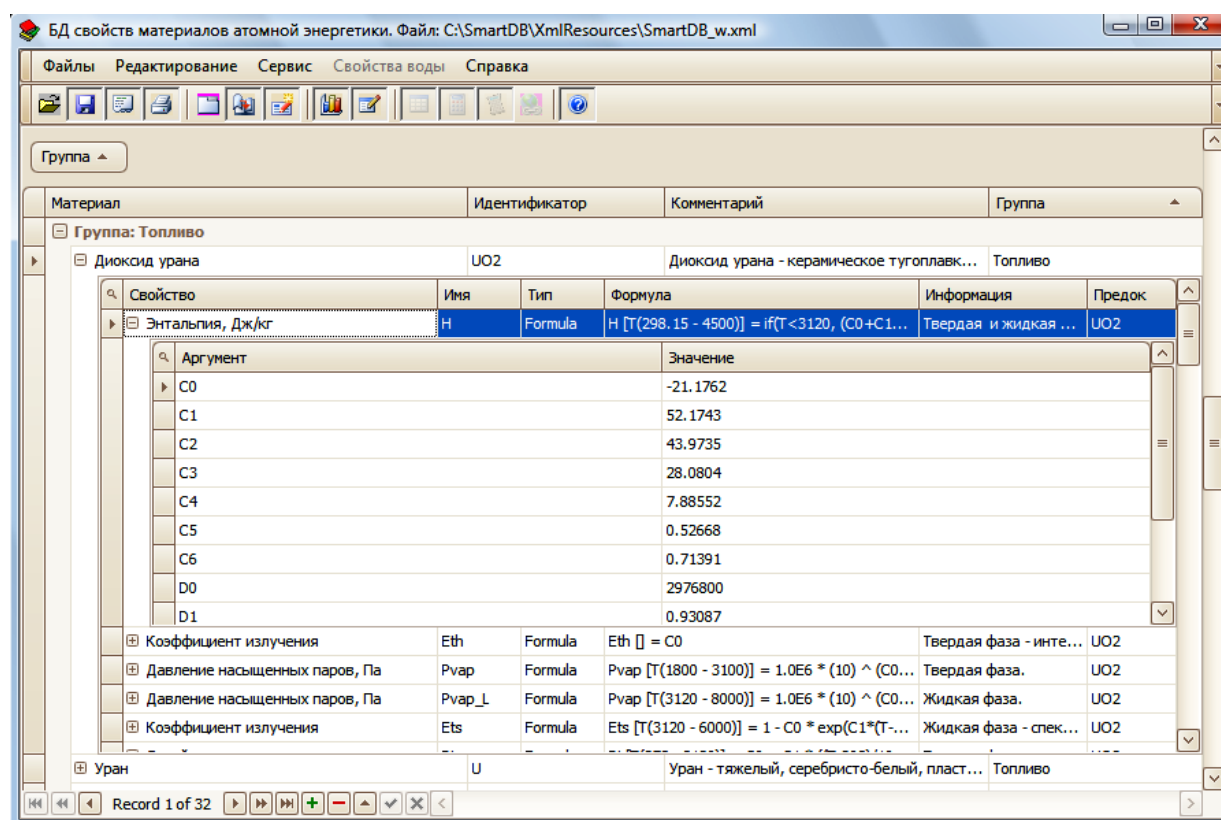


Рис.2. Графический интерфейс базы данных.

Основное меню программы включает в себя следующие пункты:

- *Файлы* – содержит стандартные операции по работе с файлами, а также пункты по установке режима работы, печати и экспорта базы данных.
- *Редактирование* – обладает полным набором функций по наполнению и редактированию единой базы данных.
- *Сервис* – вывод графика зависимости текущего свойства от аргумента. Создание таблиц с заданными параметрами для всех материалов, кроме воды.
- *Свойства воды* – создание таблиц с заданными параметрами, определение основных свойств воды и пара в однофазной и двухфазной области с помощью калькуляторов.
- *Справка* – справочная система базы данных.

Более подробно рассмотрим некоторые пункты основного меню. Пункт основного меню *Редактирование* включает в себя следующие подпункты:

- *Добавить свойство* – добавление нового свойства к текущему материалу. В открываемом диалоговом окне пользователю достаточно выбрать нужное свойство из выпадающего списка и задать тип данных: таблица или формула. Если нужное свойство отсутствует в списке, то необходимо выбрать «Другое», затем отредактировать наименование и идентификатор нового свойства. Константы вводятся в виде формул с одним коэффициентом. Если нужный материал отсутствует, то необходимо предварительно добавить материал в базу данных с помощью навигатора.

- *Вставить данные из файла* – импорт дискретных значений из текстового файла в таблицу данных текущего свойства. Этот режим позволяет существенно сократить время ввода табличных данных.

Такие возможности редактирования базы данных, как добавление нового материала, добавление или удаление строки из любой таблицы реализуются с помощью навигатора. Все пункты меню *Редактирование* и управляющие кнопки навигатора доступны только в режиме редактирования базы данных.

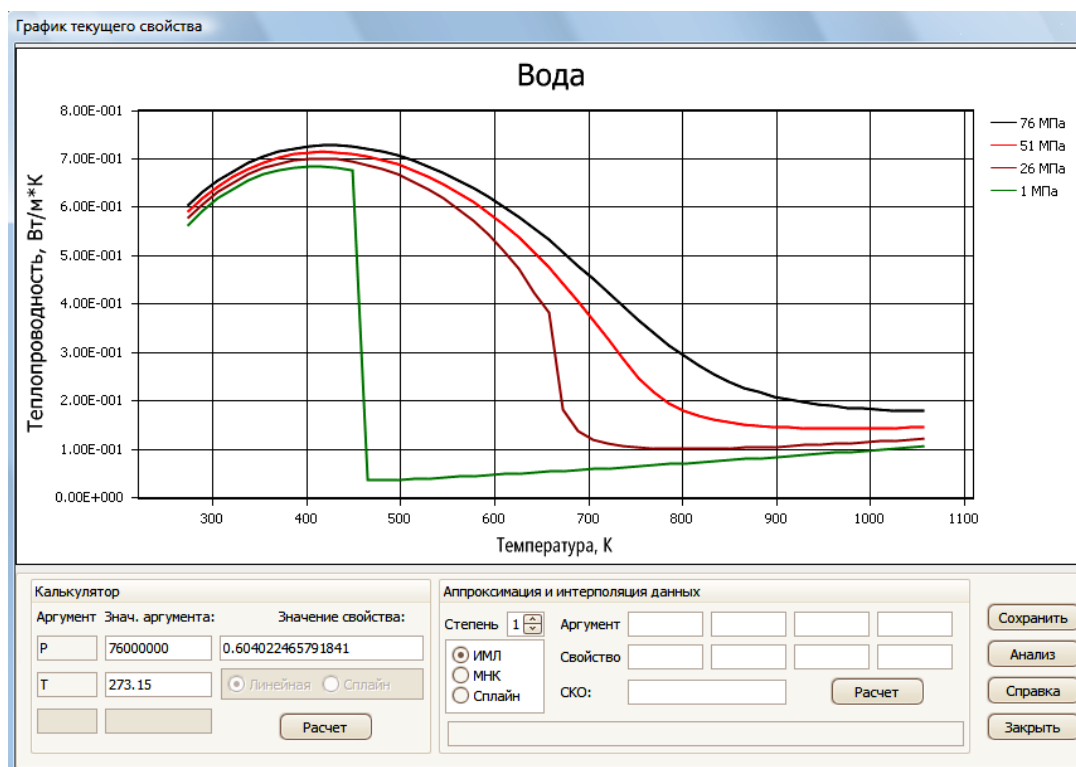


Рис.3. График для теплопроводности воды.

Пункт меню *Сервис* реализует основные сервисные возможности графического интерфейса и содержит следующие подпункты:

- *График текущего свойства* – вывод графика зависимости выбранного свойства от аргумента. Открываемое диалоговое окно помимо графика содержит калькулятор для определения значения свойства при заданном значении аргумента, а также позволяет графически сравнить данные, полученные из разных источников. Существует также возможность аппроксимировать табличные данные линейным, квадратичным или кубическим полиномом, а также построить интерполяционный сплайн. На рис.3 в качестве примера приведен график зависимости теплопроводности воды от давления и температуры.

- *Таблица текущего свойства* – создание таблицы с заданными параметрами для те-

кущего свойства, которая может быть сохранена в различных форматах: двоичном, XML, PDF, HTML, TXT, CSV, Excel и RTF.

- *БД пользователя* – создание пользователем своей собственной базы данных для конкретного расчетного кода. Такая база данных намного короче единой БД и позволяет быстрее находить и обрабатывать нужную информацию. В этом случае у пользователя появляется возможность экспериментирования со своей БД, не изменяя единую базу данных.

Расчет свойств воды и пара реализован в отдельном пункте основного меню и основан на рекомендациях Международной Ассоциации по свойствам воды и пара (IAPWS) от 1997 г. с дополнениями от 2007 г. [7, 8]. В базе данных реализованы основные и вспомогательные уравнения в переменных давление – температура, давление – энтальпия, давление – энтропия и энтальпия – энтропия, а также на линии насыщения и в двухфазной области.

Таблица для воды и пара

Параметры таблицы:

Свойства:

- Плотность (Ro) кг/м³
- Удельный объем (V) м³/кг
- Энтальпия (H) Дж/кг
- Энтропия (S) Дж/(кг·К)
- Теплоемкость (Ср) Дж/(кг·К)
- Скорость звука (W) м/сек
- Динамич. вязкость (M) Па·сек
- Теплопроводность (Тс) Вт/(м·К)
- Коэф. расширения (СVE) 1/К
- Сжимаемость (Кт) 1/Па
- Теплоемкость (Сv) Дж/(кг·К)
- Внутр. энергия (U) Дж/кг
- Пов. натяжение (St) Н/м

Тип таблицы: Таблица зад. свойства

Параметры аргументов:

Аргумент	Минимум	Максимум	Шаг
P Па	1e5	20e6	5 * 1e5
T гр. К	273.15	573.15	5

Параметры аргумента из строки

P: 1e5-9e5/1e5, 1e6-30e6/1e6, 35e6-100e6/5e6

T: 273.15-1073.15/5

Xml файл:

Т, К	100000	600000	1100000	1600000	2100000	2600000	3100000
273.15	59.662252...	568.79237...	1077.5336...	1585.8872...	2093.8544...	2601.4361...	3108.6337...
278.15	21118.043...	21615.627...	22112.875...	22609.789...	23106.371...	23602.620...	24098.539...
283.15	42117.430...	42604.953...	43092.187...	43579.131...	44065.787...	44552.156...	45038.237...
288.15	63077.763...	63556.332...	64034.650...	64512.716...	64990.532...	65468.097...	65945.413...
293.15	84011.811...	84482.262...	84952.494...	85422.507...	85892.302...	86361.879...	86831.238...
298.15	104928.06...	105391.04...	105853.82...	106316.41...	106778.81...	107241.02...	107703.05...

Кнопки: Создать, Сохранить, Сохранить в ДФ, Справка, Создать Xml, Добавить Xml, Сохранить Xml, **Закреть**

Таблица создана

Рис.4. Создание таблицы с заданными параметрами.

Меню *Свойства воды* содержит следующие подпункты:

- *Создать таблицу* – создание таблиц с заданными параметрами в однофазной и высокотемпературной области, а также на линии насыщения. На рис.4 в качестве примера создана двумерная таблица для энтальпии воды и пара в пределах температур от 298.15 К до 573.15 К и давлений от 10⁵ Па до 20 МПа с шагом 10⁵ Па и 1 К.

- *Калькулятор* – используется для расчета основных свойств воды и пара при задан-

ных параметрах в переменных давление – температура, давление – энтальпия, давление – энтропия, энтальпия – энтропия и на линии насыщения.

- *Калькулятор 2-х-фазной области* – расчет основных свойств смеси воды и пара (энтальпии, энтропии, внутренней энергии, плотности и содержания паровой фракции) при заданных значениях давления или температуры.

3. Использование базы данных в сторонних программных продуктах

В программных продуктах (расчетных кодах) база данных по свойствам материалов может быть использована традиционными способами в виде:

1. Таблиц различного формата, которые могут быть вставлены в файл исходных данных или использоваться в виде отдельных файлов.

2. XML файла, содержащего все необходимые данные по свойствам материалов для конкретного расчетного кода. Этот XML файл может содержать как табличные данные, так и формулы со значениями коэффициентов и может быть помещен в файл исходных данных программного продукта в виде блока по свойствам материалов.

3. Формул, которые вместе с коэффициентами могут быть использованы в расчетном коде. В этом случае пользователь должен самостоятельно создать расчетную функцию.

Все перечисленные выше способы обладают одним существенным недостатком. Необходимо выполнить большой объем по поиску и экспорту нужной информации из БД, созданию файла исходных данных, организации чтения, обработки и передачи данных расчетному коду. В некоторых случаях для каждого свойства создают свою отдельную программную единицу. И эту работу нужно многократно повторить практически для каждого программного продукта.

В качестве единого и удобного механизма применения базы данных были выбраны библиотеки расчетных функций на основе динамически подключаемых библиотек DLL (Dynamic Linked Libraries). Это направление использования базы данных является перспективным по следующим причинам:

- Библиотеки являются универсальным инструментом для расчетных программ, написанных на разных языках программирования и в различных операционных системах.

- Библиотеки исключают необходимость многократно создавать расчетные функции в различных кодах для одних и тех же свойств.

- Библиотеки сокращают время подготовительных операций по подключению базы данных к расчетному коду. Достаточно включить в проект файлы библиотеки (*.dll и *.lib), а также XML файл с единой базой данных.

В рамках работ по базе данных свойств материалов создано 2 библиотеки для определения свойств материалов в расчетных кодах. Библиотека `wpLibrary` используется для расчета свойств воды и водяного пара, а библиотека `mpUniLib` – для всех остальных материалов. Такое деление объясняется, прежде всего, тем, что формулы для определения свойств воды и пара намного сложнее, чем формулы для подавляющего числа остальных материалов, что исключает возможность использования анализатора формул.

Характерной особенностью библиотеки `mpUniLib` является применение специальных указателей (Handlers) и анализатора формул для вычисления свойств материалов. Handler – указатель, создаваемый на стадии инициализации данных, под которым скрывается вся необходимая информация для расчета заданных свойств материала. Указан-

ная информация берется непосредственно из XML файла, который создается с помощью графического интерфейса. Библиотека также работает с достаточно сложными формулами, когда использование парсера не эффективно. В этом случае для сложной формулы создается отдельная функция, но вызов расчетных функций остается неизменным. В силу этого эта библиотека относится к библиотекам с универсальным интерфейсом.

Использование библиотеки `mpUniLib` в программных продуктах включает в себя 3 этапа. На первом этапе идет инициализация БД, а также всех необходимых свойств, задаваемых пользователем. На втором этапе осуществляется расчет свойств в расчетном коде. На третьем этапе происходит уничтожение указателей и освобождение динамической памяти, выделенной для хранения данных.

В библиотеке `mpUniLib` реализованы возможности автоматической обработки значений аргументов, не попадающих в интервал измерений, в режиме экстраполяции данных. В библиотеке реализована также возможность автоматического сглаживания теплофизических свойств в области фазового перехода. Библиотека имеет соответствующий инструментарий для реализации пользователем своих алгоритмов сглаживания и экстраполяции данных.

Библиотека `wpLibrary` содержит расчетные функции для определения свойств воды и пара в переменных давление – температура, давление – энтальпия, давление – энтропия, энтальпия – энтропия, а также на линии насыщения и в двухфазной области. Расчетные формулы для воды и пара достаточно сложные с большим количеством коэффициентов. Это обстоятельство делает неэффективным использование анализатора формул. Поэтому для основных и вспомогательных формул в библиотеке созданы свои расчетные функции. Библиотека содержит 2 группы функций: основные и табличные функции.

Основные функции в точности реализуют уравнения Международной Ассоциации по свойствам воды и пара, поэтому обладают высокой точностью, но низкой скоростью расчетов. Они не требуют инициализации и могут быть использованы сразу же после подключения файлов библиотеки к проекту.

Применение табличных функций также предполагает наличие трех стадий: инициализации необходимых пользователю свойств, расчет, удаление массивов и освобождение динамической памяти. На стадии инициализации создаются двумерные таблицы с использованием уже упомянутых основных расчетных функций, которые в дальнейшем и применяются при расчетах свойств. К преимуществу этой части библиотеки относится высокая скорость расчетов. Недостаток – определенная потеря точности за счет билинейной интерполяции. Для сравнения: скорость расчетов свойств в переменных давление – температура при использовании основных функций составляет 1000–4500 нс, табличных – 14–16 нс.

Заключение

На основании анализа современных баз данных по свойствам материалов и опыта разработки и использования расчётных кодов для анализа безопасности АЭС определены требования к единой базе данных по свойствам материалов, системе её управления и единому механизму применения БД в расчётных кодах. С учетом сформулированных требований создана первая версия базы данных, содержащая 180 материалов и около 2500 свойств. Хранение данных в БД реализовано на основе XML файла.

Созданный для управления БД современный графический интерфейс предоставляет пользователю широкие возможности по редактированию, выводу графической информации, созданию таблиц, экспорту и импорту данных.

Разработан удобный механизм использования базы данных во внешних расчетных кодах в виде динамически подключаемых библиотек расчетных функций, существенно сокращающий время разработки кодов в части операций, необходимых для реализации свойств материалов и механизмов работы с ними: достаточно подключить файлы библиотеки (*.dll и *.lib) и XML файл базы данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. THERPRO Database: <http://therpro.iaea.org>.
2. База данных Ивтантермо: <http://www.chem.msu.su/rus/handbook/ivtan>.
3. MPDB - Material Properties Database: http://www.jahm.com/pages/about_mpdb.html.
4. База данных MatPRO: <http://www.paulin.com/MatPRO.aspx>.
5. Интернет-приложение по теплофизическим свойствам воды и водяного пара: <http://twf.mpei.ac.ru/ochkov/WSPHB/index.html>.
6. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. International Association for the Properties of Water and Steam, 2007.
7. *Wagner W., Kretzschmar H.* International Steam Tables. Properties of water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS – IF97. Second edition. Springer, 2008.
8. muParser – a fast math parser library: <http://muparser.sourceforge.net/>.
9. Development of Data Base for Thermo-Physical Properties of Corium: Pure Components. Report on the Project 3078p, Task 1.1. NSI RAS, 2006.
10. Development of Data Base for Thermo-Physical Properties of Corium: Fitting Models for Pure Components. Report on the Project 3078, Task 1.2. NSI RAS, 2007.
11. База данных кода СОКРАТ. ИБРАЭ, 2007.
12. INSC Material Properties Database: <http://www.insc.anl.gov/matprop/>.
13. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник под общей редакцией П.Л. Кириллова. – М.: ИздАТ, 2007.
14. *Варгафтик Н.Б.* Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972.
15. *Чиркин В.С.* Теплофизические свойства материалов ядерной техники. – М.: Атомиздат, 1968.
16. *Варгафтик Н.Б.* и др. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
17. *Арзамасов Б.Н.* и др. Конструкционные материалы. Справочник. – М.: Машиностроение, 1990.
18. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
19. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
20. *Рид Р.Г.* и др. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1982, с.592.
21. Handbook of Nuclear Engineering. Vol.1. Nuclear Engineering Fundamentals. Springer, 2010.
22. *Глушко В.П.* Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание. Т.1–4, 3-е издание, Наука, 1978–1982.