

На правах рукописи

Иванченко Евгений Сергеевич

**Прецизионные модели ударных адиабат и база ТЕФИС.**

Специальность - 05.13.18

математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата

физико-математических наук

Москва – 2009

Работа выполнена в Институте Математического Моделирования РАН.

Научный руководитель – Доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН  
Калиткин Николай Николаевич

Официальные оппоненты – Доктор физико-математических наук,  
Якобовский Михаил Владимирович.

– Доктор технических наук,  
Фунтиков Александр Иосифович.

Ведущая организация ФГУП РЯЦ ВНИИЭФ.

Защита состоится

на заседании диссертационного совета  
K002.058.01 при институте математического моделирования РАН по адресу:  
125047, Москва, Миусская пл., 4а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
института математического моделирования РАН.

Автореферат разослан

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук

Змитренко Н.В.

## Общая характеристика работы.

### Актуальность темы.

Большое количество научных групп в различных институтах для решения широкого спектра прикладных задач занимаются расчетам различных газодинамических моделей.

Для успешного решения этих задач надо с хорошей точностью знать разнообразные свойства веществ, которые являются коэффициентами этих уравнений: термодинамические функции, проводимость, теплопроводность, газовую, электронную и ионную вязкости, коэффициенты диффузии разных сортов частиц, пробеги фотонов, коэффициенты обмена энергией между компонентами смеси и ряд других.

Важно заметить, что требуются широкодиапазонные данные о свойствах веществ! В принципе их следует получать экспериментальными или теоретическими методами. Однако в экстремальных состояниях эксперименты очень трудны и весьма дороги, а строгие теории не удается создать. Поэтому свойства веществ приходится находить также методом математического моделирования, т. е. строить более или менее полные модели и проверять их адекватность по достаточно представительному набору контрольных экспериментов.

Проверка адекватности является ключевым звеном методологии математического моделирования. Без такой проверки само построение модели является лишь схоластическим упражнением, не представляющим серьезного физического интереса, поскольку остается невыясненным, справедлива ли модель.

Первые эксперименты были статическими, в них исследовалась изотермическая сжимаемость веществ, и первый в этой области был Бриджмен [1]. Он исследовал сжимаемость нескольких десятков веществ до давлений в 50-100 кБар. На сегодняшний день наиболее эффективным направлением экспериментального подхода являются эксперименты по ударным сжатиям веществ: взрывчатые вещества создают давления до 0,5 Мбар. Разгоняя металлическую пластину продуктами взрыва, можно получить давление 5—10 Мбар при ее ударе о другое вещество. В подземных ядерных взрывах достигаются давления в сотни Мбар. Однако, в

отличие от статических сжатий, здесь состояния вещества лежат не на изотерме, а на ударной адиабате и характеризуются сильным нагревом.

Основной проблемой экспериментов является не только цена – но так же высокая сложность и неточность получаемых результатов, которая к тому же варьируется в зависимости от используемого метода и конкретного эксперимента.

Таким образом, появляется двоякая задача: с одной стороны эксперименты в основном нужны для верификации различных моделей, но с другой стороны необходимо каким-то образом контролировать точность самих экспериментальных данных.

Для решения этой проблемы может быть предложено два основных направления:

1. Оценка точности на основе совокупной обработки экспериментальных данных. Другими словами – статистический анализ точности эксперимента на основе массива уже имеющихся данных.
2. Вычисление точности проведенного эксперимента на основе сверки с моделью, для которой заранее известно, что она адекватно описывает исследуемый диапазон.

Однако гораздо более выгодно использовать объединение этих подходов.

Необходимо строить метод анализа точности на основе как модельных расчетов (для тех областей, в которых мало точек или же эксперименты вообще отсутствуют) так и по совокупной обработке экспериментальных данных.

Собственно отсюда вытекает постановка задачи:

1. Нам необходимо построить модели, позволяющие с хорошей точностью описывать как можно более широкий диапазон условий.
2. Так как в области низких давлений и температур адекватные модели до сих пор не построены, то нам нужны методы, позволяющие проводить склейку теоретически рассчитанных кривых с результатами экспериментов, которые восполнят отсутствие моделей в зоне низких давлений.

3. Естественно необходимо создать хранилище (базу данных), где могли бы храниться результаты экспериментов.

Стоит отметить, что создание подобных баз данных было и является важной задачей, которой уделяется серьезное внимание большинством исследователей.

Исторически впервые задачи по исследованию поведения веществ в экстремальных условиях были поставлены в США [2], там начиная с 1945, в лабораториях Лос Аламоса [3] начались проводиться эксперименты по ударным сжатиям.

Конечным итогом любых экспериментов является обработка полученных результатов. Изначально каждое подразделение проводило исследования, опираясь только на свои данные, что приводило к существенным различиям в характеристиках веществ, полученных разными лабораториями. И основной причиной этих разногласий были не систематические погрешности, а именно относительная узость исследуемого диапазона.

Пример подобной ситуации приведен на рис. 1. В этом случае фактически невозможно, что либо сказать о поведении кривой.

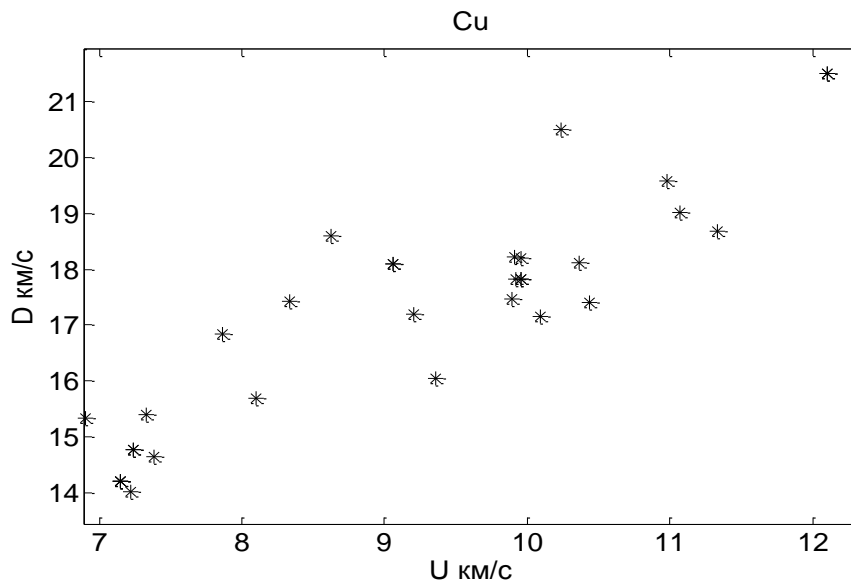


Рис 1 Участок ударной адиабаты меди.

Для преодоления этой проблемы в лабораториях Ливермора [4] в 1949 под руководством Эдварда Теллера была заложена база данных по теплофизическим свойствам веществ, получившая название СЕЗАМ. В эту базу вошли многолетние результаты работ Лос Аламоса [5], Ливермора [6], и лабораторий военно-морского флота САНТИЯ.

На сегодняшний день это наверняка крупнейшая база данных, но есть одна загвоздка: большая часть данных сосредоточена в закрытой части этой базы, к которой естественно мы доступа не имеем. Помимо закрытой части СЕЗАМ содержит так же и открытую часть, в которой содержится некоторое количество экспериментальных данных, но в основном содержимое открытой части базы сезам – это огромное количество модельных предположений. Причем в большинстве случаев ни о точности расчетов, ни об используемых моделях, ни о диапазоне адекватности этих моделей информации нет. Кроме этого в базе содержится достаточно большое количество неточностей, и подчас даже противоречивых данных (Возможно внесенных туда специально). Все это несколько затрудняет использование открытой части базы СЕЗАМ в практических целях.

Параллельно с исследованиями в США, в СССР начиная 1946 года [7] в ядерном центре в Сарове [8] при содействии таких выдающихся ученых как А.Д. Сахаров, Д.А. Франк-Каменецкий, Е.И. Забабахин, в своем роде лидеров новой научной дисциплины – физики высоких плотностей, были также основаны лаборатории по исследованиям поведения веществ в экстремальных состояниях. За более чем полувековую историю у нас было проведено огромное количество экспериментов. Результаты этих экспериментов и стали явились фундаментом создаваемой в Сарове, под руководством Альтшулера, собственного объединенного компендиума.

Важно заметить, что результаты работ отечественных и западных ученых не взаимоисключающие, так как разные лаборатории проводили эксперименты для разных начальных условий, для разных веществ с различными пористостями. Кроме того эксперименты проводились на различных экспериментальных установках с весьма различающимися диапазонами скоростей и классами точности. Может возникнуть естественный вопрос в целесообразности проведения такого количества экспериментов. Если принять во внимание что на сегодняшний день имеются результаты для ударных сжатий более чем 670 веществ, то порядка двадцати тысяч

экспериментов, информация о которых нам удалось получить на сегодняшний день, не покажутся таким уж большим количеством. Более того, для пористых образцов достаточное для статистической обработки количество экспериментов проведено только для нескольких образцов. Именно поэтому обработка пористых веществ несет в себе дополнительную трудность – малое количество экспериментальных данных делает обработку очень сложной, кроме того, до сих пор не вполне ясна зависимости характеристик вещества от коэффициента пористости – что делает невозможным обработку всех имеющихся данных для пористых образцов одновременно, и вынуждает обрабатывать отдельно каждый диапазон пористостей. И наконец, разрозненность, и отсутствие общего формата делают применение имеющихся данных затруднительным и весьма трудоемким.

Таким образом, возникает важная задача объединения всех доступных источников в единую базу данных, специально предназначенную для упрощения их последующей обработки и использования.

Создание подобной базы – это очень трудоемкий, но весьма важный проект. Одной из таких реализаций является база данных Института Теплофизики Экстремальных Состояний [9]. В эту базу уже включена большая часть данных из большинства упомянутых ранее источников. База ИТЭС насчитывает порядка 17000 точек. Однако при проведении сверок с последними редакциями оригинальных компендиумов выяснилось наличие пробелов в данных, ошибок и просто опечаток. Подобного рода недочеты могут влиять на результаты последующих обработок, в особенности, если речь идет об обработке пористых веществ.

Следовательно, важно иметь как можно более полную базу, содержащую как можно меньше неточностей.

### **Цель работы.**

Во-первых, построить хранилище для совместного хранения совокупности экспериментальных данных по ударным сжатиям веществ. Внести в нее исправленные и дополненные данные из баз ИТЭС, Сезам. Сверить данные с последними редакциями компендиумов соответствующих лабораторий.

Во-вторых – создание и реализация прецизионных моделей для широкодиапазонного представления ударных адиабат. Что позволит проводить дальнейшую обработку материалов. И наконец, построение методов анализа точности экспериментальных данных. Что в купе с имеющимися моделями и совокупностью экспериментальных данных позволит строить методы итерационного повышения точности широкодиапазонных ударных адиабат.

### Научная новизна.

У данной работы было две основных цели:

Первое - создание базы данных по теплофизическим свойствам веществ в экстремальных состояниях. Помимо создания базы необходимо было так же реализовать комплекс, позволяющий управлять базой, а так же проводить обработку данных и рассчитывать различные термодинамические характеристики веществ.

Таким образом, в результате работы создана крупнейшая база данных по теплофизическим свойствам веществ, включающая в себя около 20 000 результатов ударных экспериментов, для 670 веществ. А так же основные свойства этих веществ и данные об уровнях ионизации первых 105 элементов, что в общей сложности составляет примерно 5 000 уровней ионизации.

В базу включен целый ряд высокоточных моделей для расчета целого ряда теплофизических свойств веществ:

- 1) Модель Томаса-Ферми с квантовой и обменной поправками.
- 2) Модель Ионизационного Равновесия.
- 3) Модель Электронного Переноса.

В дополнение ко всему вышеперечисленному, база ТЕФИС содержит в себе таблицы термодинамических величин, рассчитанных по разным моделям на достаточно подробных сетках. Что при наличии хороших методов аппроксимации, (в том числе и включенных в комплекс) позволит избежать временных затрат на расчет термодинамических таблиц для решения целого ряда прикладных задач при использовании базы ТЕФИС. В данное время проводятся работы по внесению в эти таблицы модельные расчеты из базы СЕЗАМ, что позволит проводить сравнения и дальнейшие расчеты по



широчайшему набору моделей без существенных затрат вычислительных мощностей.

Вторая цель - разработать высокоточный метод построения широкодиапазонных ударных адиабат, пригодный для обработки как сплошных, так пористых веществ. На основе этого метода построен метод объективной оценки точности экспериментальных данных, включая оценку систематических погрешностей лабораторий. Кроме того, на основании вычисленных оценок точности экспериментальных данных был разработан метод итерационного повышения точности широкодиапазонных ударных адиабат.

Все эти характеристики базы позволяют утверждать, что на сегодняшний день это наиболее полный из доступных источников по теплофизическим свойствам веществ.

#### **Практическая ценность работы.**

Разработан численный алгоритм прецизионного расчета широкодиапазонных ударных адиабат, как для сплошных, так и для пористых веществ.

На основе предложенного алгоритма реализован метод автоматической оценки точности экспериментальных данных и метод итерационного повышения точности широкодиапазонных ударных адиабат пригодный как для сплошных, так и для пористых веществ.

Создана база данных по теплофизическим свойствам веществ. База включает в себя крупнейший набор экспериментальных данных, а так же – комплекс программ для высокоточных модельных расчетов. База выполнена как единый, интегрированный комплекс. Кроме того она рассчитана на дальнейшее расширение.

#### **Апробация работы.**

Результаты работы докладывались на международных конференциях:

3rd Moscow Workshop on Targets and Applications, October, 2007 Moscow, Russia.

International Workshop «Numerical Analysis and Scientific Computing» (NASCom'08) 13-17 октября 2008, Ростов-на-Дону.

Physics of high-energy density in matter. November 24-25 2008. Москва.

XI Харитоновские научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. 2009 г. Саров.

Работа выполнена при поддержке грантов:

- РФФИ:08-01-00171
- РФФИ:05-01-00152
- РФФИ 05-01-08006
- НШ-1918.2003.1
- НШ-5772.2006.1

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, 4х глав, заключения и приложений. Итого – пять глав и приложение.

Общий объем – 100 страниц.

### **Публикации.**

По теме работы сделано 5 публикаций:

Е.С.Иванченко, Н.Н.Калиткин, Л.В.Кузьмина. Главные ударные адиабаты в базе теплофизических свойств веществ (ТЕФИС). Математическое моделирование. Том 20, №6, 2008г. Стр. 99-110.

Е.С.Иванченко, Н.Н.Калиткин, Л.В.Кузьмина. Квантово-статистический расчет термодинамики и ударных адиабат (программы КСМ). Математическое моделирование. Том 20, №7, 2008г. Стр. 30-44.

TEFIS - Database on Thermophysical Properties of Substances under Extreme conditions E.S. Ivanchenko, N.N. Kalitkin, I.A. Kozlitin, L.V.Kuzmina, K.I.Lutskiy, I.A. Panin

Е.С. Иванченко, Н.Н. Калиткин. Глобальные ударные адиабаты пористых веществ и база ТЕФИС. с. 142-143. XI Харитоновские чтения. Сборник тезисов докладов. 2009 г. Саров.

E.S. Ivanchenko, N.N. Kalitkin Wide-range Hugoniots of Porous Substances and the TEFIS database. p. 143-144. XI Харитоновские чтения. Сборник тезисов докладов. 2009 г. Саров.

Принята в печать статья: Иванченко Е.С. Калиткин Н.Н. Интерпретация ударно волновых данных в базе ТЕФИС. Математическое Моделирование. 2009 г. Москва.

### **Краткое содержание работы.**

#### *Первая глава.*

Содержит введение, обоснование актуальности темы, формулировку основных целей, начальные сведения, краткий обзор комплекса ТЕФИС и краткое содержание остальных глав.

#### *Вторая глава.*

Описывает используемые в базе ТЕФИС методы расчета термодинамических функций, необходимые для расчета асимптотик ударных адиабат. Глава содержит обоснование выбора именно этих методов и демонстрирует их эффективность. Схематически диапазоны применения моделей изображены на (Рис. 2).

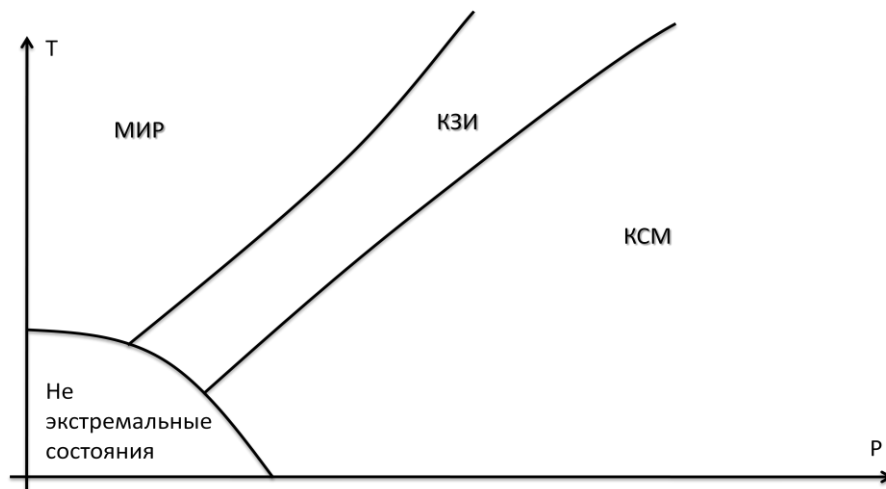


Рис 2 Зоны адекватности моделей расчета термодинамики в базе ТЕФИС.

В этой главе описывается модель Томаса-Ферми с квантовыми и обменными поправками, как модель, принятая для расчета сверхплотной плазмы в базе ТЕФИС.

Приводится автомодельная модификация этой модели для расчета любого заданного вещества, позволяющая в несколько порядков повысить скорость расчетов фактически без потери точности.

В этой главе так же есть раздел посвященный краткому описанию модели ионизационного равновесия, использованной для расчета газовых плотностей в базе ТЕФИС.

И в заключение приведена информация о квазизонной модели, которую предполагается использовать в качестве модели для расчетов в промежуточных между газовыми и сверхплотными состояниями.

Основная причина, по которой в работе уделяется столь подробное описание использованных моделей для построения термодинамики – ответить на частые вопросы об области применимости расчетов, об их точности и адекватности. Кроме того, знание об используемых методах расчета позволяет судить о точности дальнейших расчетов широкодиапазонных ударных адиабат, что является весьма важным фактом в этой работе.

Следует понимать, что подробное описание каждой из упомянутых моделей – предмет отдельной работы, поэтому в данной работе приведены лишь основные моменты и положения используемых методов.

### *Третья глава.*

Третья глава посвящена ударным адиабатам. В ней рассказывается методика вычисления ударных адиабат на основе табличных термодинамических функций.

В этом разделе описывается метод решения уравнения:

$$\begin{cases} E - E_0 = 0.5(P + P_0)(1/\rho_0 - 1/\rho) \\ \rho = \rho_0 D / (D - U), P = P_0 + \rho DU \end{cases}$$

Описываются требования к точности решения, и приводятся решения, опирающиеся как на классические методы [10], [11] так и на оригинальные методы с повышением точности. В совокупности предложенные методики позволяют получить точность порядка 0.1%.

В следующем разделе этой главы выводятся асимптотики ударных адиабат в диапазоне адекватности модели Томаса-Ферми с поправками. Эти асимптотики имеют следующий вид:

$$D_{КСМ}(U) \approx C + BU + AU^2, C > 0, B > 1, 1 \gg A > 0$$

Приводятся оценки точности данной аппроксимации.

Выводятся зависимости коэффициентов А,В,С от пористости материала, имеющие следующий вид:

$$\lg C(m) \approx C + \gamma \lg m,$$

$$\lg A(m) \approx a + \alpha \lg m,$$

$$\lg[B(m) + 2\sqrt{A(m)C(m)} - 1] \approx b + \beta \lg m$$

В следующем разделе приводится асимптотика поведения ударных адиабат при низких давлениях, опираясь на классическое представление о поведении ударных адиабат при низких давлениях:

$$D_{EXP}(U) \approx c_0 + b_0 U$$

Приводится анализ эффективности этой аппроксимации на ряде веществ для различных пористостей. Для примера на рис. 3 приведу начальный участок ударной адиабаты для меди, в областях, где кривая линейна.

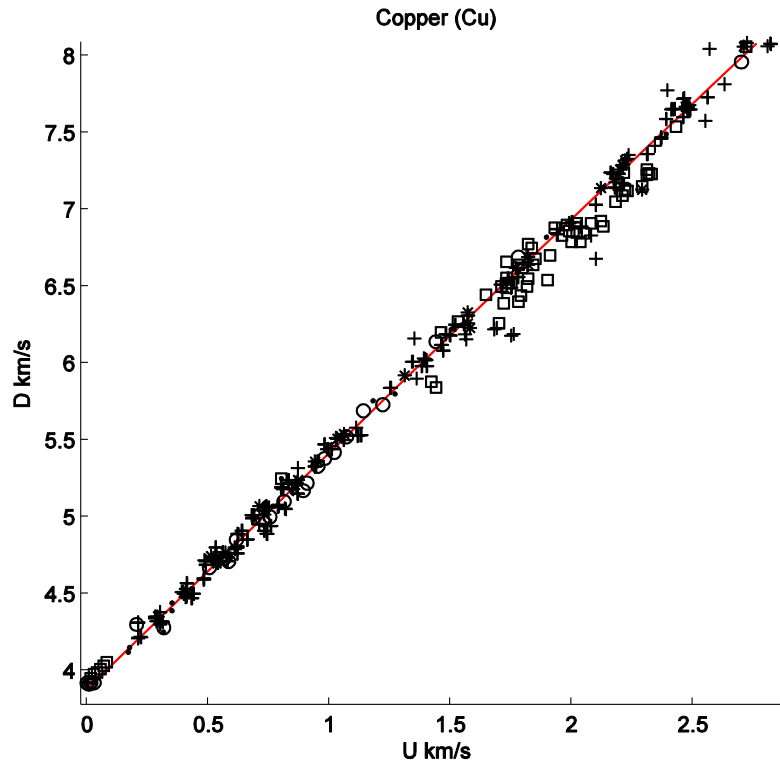


Рис 3 Ударная адиабата меди при низких давлениях. Различные маркеры соответствуют экспериментам различных исследовательских групп.

В следующем разделе приводится метод расчета широкодиапазонных ударных адиабат, основанный на склейке квантово-статистических адиабат и кривых, основанных на экспериментальных данных.

Классически это решение основывается на построении следующей кривой:

$$D(u) = D_{\text{КСМ}}(u) - \frac{C - c_0}{1 + \mu u + \mu^2 u^2}, \mu = \frac{b_0 - B}{C - c_0}$$

Где  $b_0, c_0$  это параметры линейной аппроксимации, рассчитанные на основе линейной аппроксимации результатов экспериментов при низких давлениях, а  $A, B, C$  – параметры квадратичной аппроксимации квантово-статистической кривой.

Однако у этого подхода есть существенный недостаток, это то, что не учитываются экспериментальные данные для области высоких давлений, то есть в тех участках, где кривая уже не линейна. А это достаточно массивное количество данных.

В работе предложен несколько другой подход. Предложено искать широкодиапазонную ударную адиабату в следующем виде:

$$D(u) = D_{\text{КСМ}}(u) - \alpha F(\beta u)$$

Причем,  $\alpha$  и  $\beta$  вычисляются с учетом всех экспериментальных данных, а  $D_{\text{КСМ}}(u)$  - это параболическая аппроксимация на основе квантово статистической модели.

Приводятся оценки эффективностей различных функций  $F(x)$  и оценки эффективности наиболее успешной из них:

$$F(x) = \frac{1}{1 + x(1 + x)}$$

Несмотря на малые отличия от классических методик, этот подход имеет достаточно серьезные преимущества и это так же демонстрируется в этой главе на основе демонстрации эффективности этого метода на широком ряде веществ. Рис. 4 отображает суть метода – и так же демонстрирует поведение широкодиапазонной ударной адиабаты.

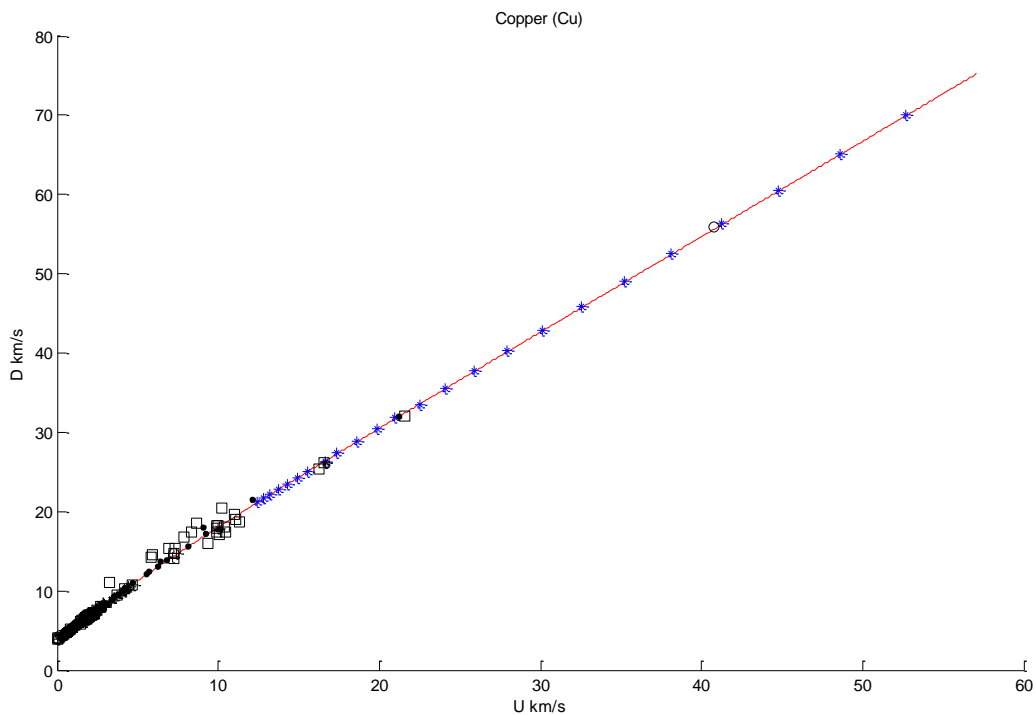


Рис 4 Широкодиапазонная ударная адиабата меди. Звездочки - результаты расчета на основе модели ТФП. Линия - широкодиапазонная ударная адиабата. Другие маркеры - результаты экспериментов различных исследовательских групп.

И в заключение приводится метод расчета широкодиапазонных ударных адиабат для пористых веществ, показывается эффективность этого метода для расчетов пористых веществ с пористостью  $m \leq 10$  на примере веществ с наиболее представительной выборкой экспериментов с пористыми образцами (см. рис. 5).

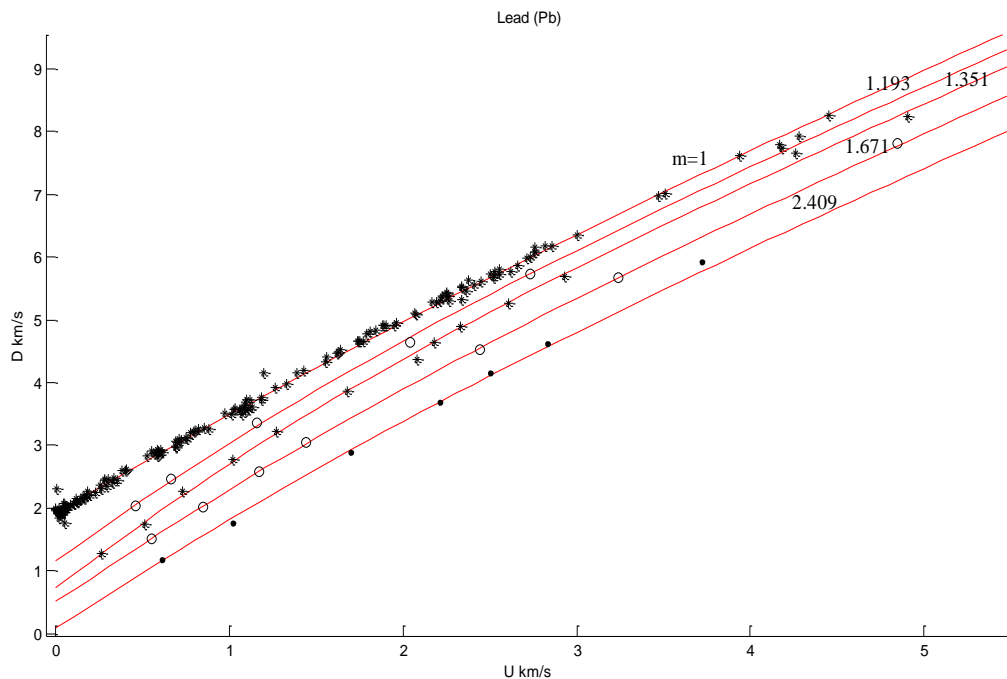


Рис 5 Ударные адиабаты для свинца с различными пористостями.

#### Четвертая глава.

Четвертая глава посвящена методу оценки точности экспериментальных данных. Эти оценки проводятся с помощью оценок статистических характеристик совокупности экспериментальных данных и на основе сравнений этих характеристик с характеристиками распределения Гаусса. В этой главе описывается необходимость такой оценки, как по отдельным точкам, так и оценка систематических погрешностей лабораторий и общего качества экспериментов. Приводится описание методик итерационного повышения точности для расчетов широкодиапазонных ударных адиабат, позволяющих получать согласованные оценки объективной точности экспериментальных данных по всему диапазону.



*Пятая глава.*

Пятая глава полностью посвящена описанию архитектуры комплекса ТЕФИС, его схематичная структура изображена на Рис 6.

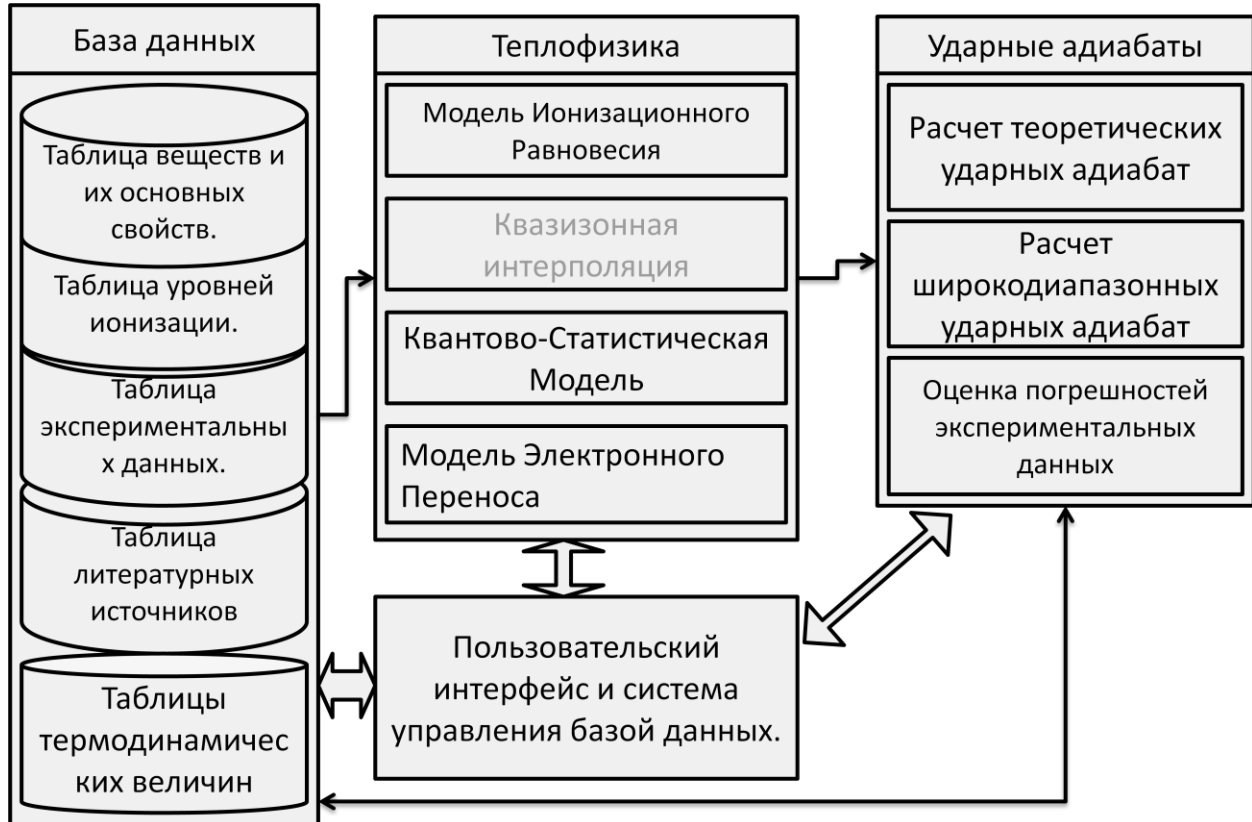


Рис 6 Архитектура комплекса ТЕФИС.

В этой главе описывается структура базы данных (рис 7.) и технологии, использованные для ее построения. Основная проблема заключалась в выборе системы, поскольку были сформулированы довольно жесткие требования: С одной стороны сама база данных должна быть независимой от платформы. С другой стороны она должна быть достаточно быстрой, так как при обработках экспериментальных данных возникает достаточно большое количество запросов к базе. И в-третьих, база должна поддерживать работу, как на локальной машине, так и на сервере.

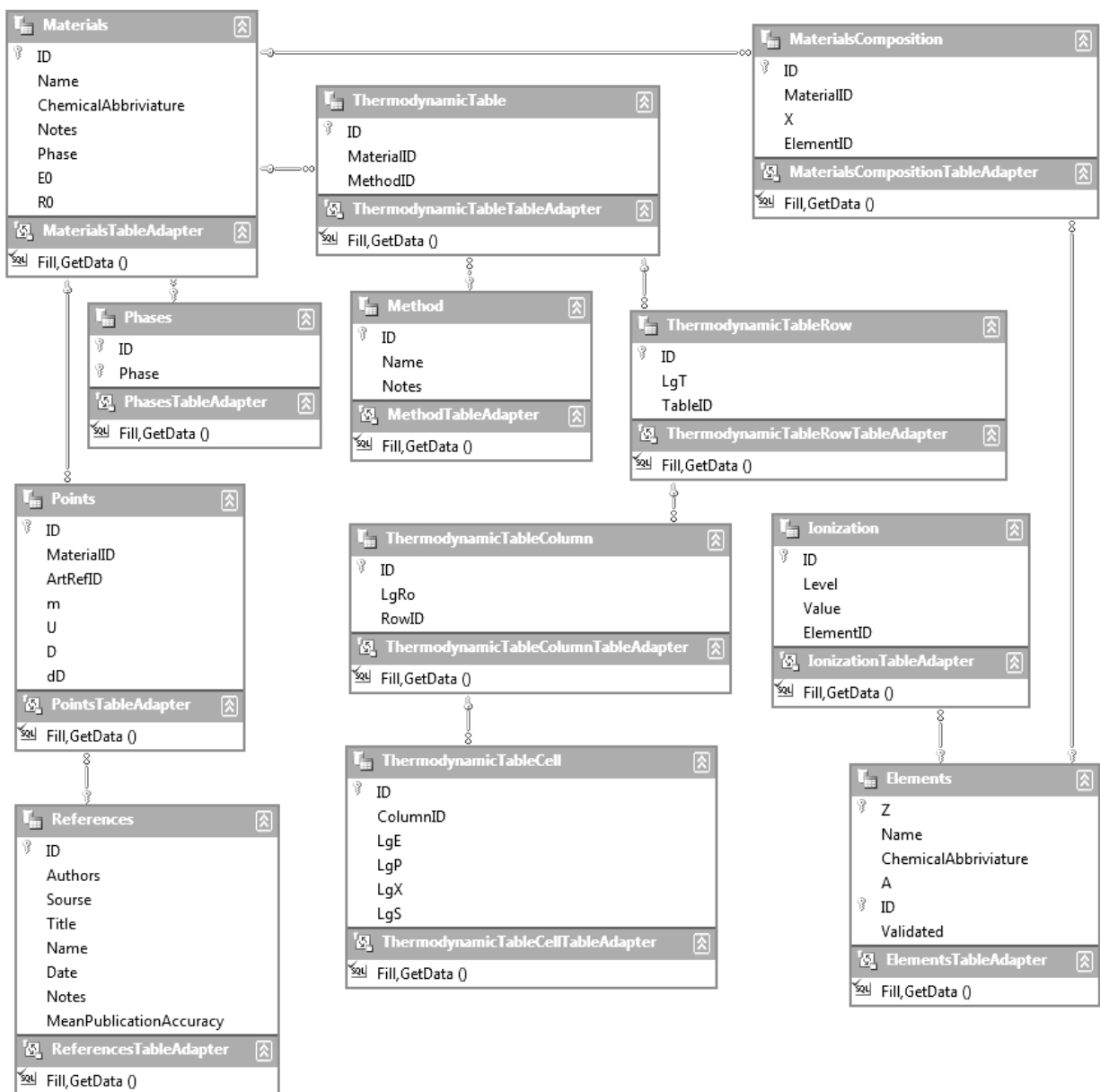


Рис 7 Схема базы данных.

Для того чтобы удовлетворить всем этим требованиям в работе был выбран достаточно нестандартный подход. В качестве формата данных для экспорта базы данных из приложения был выбран стандарт XML, с жестким определением схемы на языке XSD. В качестве основного хранилища был выбран Microsoft SQL Server Compact Edition – бесплатно распространяемая версия известного SQL сервера, отличающаяся тем, что нет необходимости устанавливать дополнительные компоненты. Это позволило сделать базу предельно простой и легко расширяемой. Кроме того, Microsoft SQL Server

Compact Edition отличается весьма высокой производительностью, что позволяет проводить различные выборки из базы данных с огромной скоростью.

Так же описывается архитектура управляющей системы комплекса ТЕФИС, описывается дизайн пользовательского интерфейса. И наконец, описывается методика интеграций различных модулей, выполненных в разных языковых средах (C++, Fortran, MATLAB), в том числе и модулей, выполняющих расчеты на основе разработанных моделей.

Для реализации основной управляющей среды (менеджера) используется популярная среда Microsoft .NET Framework 3.5. Использование этой системы позволило реализовать удобный доступ, как к базе данных, так и к реализациям моделей, которые реализовывались на C++, Fortran и MATLAB. Столь тесное переплетение различных языковых платформ позволило более направлено использовать их инструментарию. Так, пользовательский интерфейс и доступ к данным реализовывался на языке C#, который позволяет быстро и эффективно решать подобные задачи, однако он не достаточно производителен при серьезных математических расчетах. Для этого использовались языки C++ и Fortran, которым в плане вычислений нет равных. MATLAB же использовался для моделей, которые находятся в стадии совершенствования, потому что он обладает богатейшим арсеналом визуализации и богатым арсеналом математических библиотек, что было важным на этапе разработки и отладки моделей. В будущем, для увеличения производительности планируется реализация этих моделей на более быстродействующих платформах.

В заключительной части этой главы приводится сравнение комплекса ТЕФИС с существующими базами данных Сезам и ИТЭС. Выявляются и анализируются основные отличия, достоинства и недостатки комплекса.

#### *Заключение.*

В заключении сформулированы основные результаты работы.

#### *Приложение.*

В приложении приведены таблицы параметров широкодиапазонных ударных адиабат для основных элементов, и оценка их точности.

Помимо табличного представления в приложении приведены графики широкодиапазонных ударных адиабат с нанесенными экспериментальными данными.

И наконец, приведены исходные коды программ и модулей комплекса ТЕФИС.

### Основные результаты.

- ✓ Построение высокоточной модели широкодиапазонных ударных адиабат для сплошных и пористых веществ.
- ✓ Разработка прецизионных алгоритмов расчета ударных адиабат.
- ✓ Разработка методов статистического анализа экспериментальных данных с объективной оценкой их фактической точности.
- ✓ Создание методов итерационного повышения точности широкодиапазонных ударных адиабат.
- ✓ Создание пополняемой базы данных ТЕФИС, объединившей в себе все доступные на сегодняшний день компендиумы ударно-волновых экспериментальных исследований.
- ✓ Создание комплекса ТЕФИС объединившего в себе как базу данных ТЕФИС, так и целый ряд моделей и программ для расчета теплофизических свойств веществ в экстремальных состояниях.

### Литература.

1. Бриджмен П.В. // Твердые тела под высоким давлением. / Под ред. В. Пола и Д. Варшауэра. М.: Мир, 1966.
2. R.W. Goranson, D. Bancroft, B.L. Burton et al. // Ibid. 1955. Vol. 26, N 12. P. 1472-1479.
3. [http://en.wikipedia.org/wiki/Los\\_Alamos\\_National\\_Laboratory](http://en.wikipedia.org/wiki/Los_Alamos_National_Laboratory)
4. [http://en.wikipedia.org/wiki/Lawrence\\_Livermore\\_National\\_Laboratory](http://en.wikipedia.org/wiki/Lawrence_Livermore_National_Laboratory)
5. LASL shock Hugoniot data /Ed. S.P. Marsh. Berkley etc.: Univ. Calif. press. 1980.
6. Compendium of shock wave data / Ed. M. van Thiel. Livermore: Univ. Calif. press. 1977.

7. Л.В. Альтшулер, К.К. Крупников // История советского атомного проекта: (40-е и 50-е годы): Международный научный симпозиум ИСАП-96. М.: ИздАТ., 1997. Т. 1 Стр. 184-191.
8. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сапов>
9. <http://www.ihed.ras.ru/rusbank/>
10. Н.Н. Калиткин, Л.В. Кузьмина, Широкодиапазонные ударные адиабаты. стр. 107-120. //Ударные волны и Экстремальные состояния вещества. под редакцией В.Е. Фортова, Л.В. Альтшулера, Р.Ф. Трунина, А.И. Фунтикова. Москва "Наука" 2000г.
11. Н.Н. Калиткин, Л.В. Кузьмина, Метод расчета ударных адиабат: Препр. ИПМат. АН СССР №159. М., 1988, 24 с.

**ИВАНЧЕНКО ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ.**

**ПРЕЦИЗИОННЫЕ МОДЕЛИ УДАРНЫХ АДИАБАТ. БАЗА ТЕФИС.**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК**

Отпечатано в Институте математического моделирования РАН

Тираж 100 экз.