

РАЗРАБОТКА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ АСНИР «ТОТ МГТУ» ДЛЯ АНАЛИЗА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ, ОПТИЧЕСКИХ И ТРАНСПОРТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНЫХ СРЕД ПЛАЗМЕННЫХ И ФОТОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Асп. Д.М. МИХАЙЛОВ, асп. Д.О. НОГОТКОВ, д-р физ.-мат. наук, проф. Ю.С. ПРОТАСОВ

Представлены результаты исследования термодинамических и оптических свойств плазмообразующих элементов (металлы, диэлектрики, полупроводники) в широком диапазоне температур, плотностей и энергии квантов.

Findings of research concerning thermodynamic and optical properties of plasma-forming elements (metals, dielectrics, semiconductors) at density, quantum energy and wide temperature range are given.

Для разработки, исследования и оптимизации широкого спектра плазмохимических устройств и технологических комплексов (плазменного синтеза и модификации поверхности, высокотемпературного формообразования полимеров) необходимо проанализировать термодинамические и оптические свойства их активных сред: ионизационного состава, термодинамических функций (давление, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, изобарные и изохорные теплоемкости, эффективный показатель адиабаты, скорость звука, уравнения состояния), пробегов фотонов, частотных зависимостей коэффициентов поглощения/отражения, эмиссионных/абсорбционных спектров, коэффициентов обмена энергией между компонентами смесей рабочих веществ. Несмотря на многолетнюю историю исследований, объем надежных данных по термодинамическим и оптическим свойствам плазмы ограничен [1—14]. Достаточно подробные сведения получены лишь для плазмы воздуха и его компонентов [1—6]; в узких диапазонах параметров (T , ρ , $h\nu$) такие данные известны для некоторых газов, диэлектриков и металлов [5—14]. Значительное число теоретических работ посвящено проблеме создания широкодиапазонных уравнений состояния вещества и определению термодинамических свойств веществ в экстремальных условиях [15—18], что делает задачу создания программных комплексов и генерацию тематических баз и банков данных по термодинамическим и оптическим свойствам низкотемпературной плазмы сложного химического состава актуальной.

Целью описываемого цикла исследований является создание автоматизированной системы научных и инженерных расчетов (АСНИР) термодинамических, оптических и транспортных (ТОТ) свойств газо-плазменных активных сред и плазмообразующих элементов плазмохимических установок различного химического состава в широком диапазоне параметров: температур $T \sim 5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^4$ К, плотностей $\rho \sim 10^{-4}$ — 10^2 кг/м³ и энергии квантов $h\nu \sim 10^{-1}$ — 10^3 эВ. Представленное ниже его описание содержит примеры программной реализации АСНИР ТОТ и генерации соответствующих баз и банков данных по термодинамическим и оптическим свойствам плазмы элементов полимерного ряда (С, Н, F, N, O, Si).

Светлана Яковлевна!

Давайте аннотации сразу! Русская аннотация была 12 строк, а вы ВСЕ уместили в 6! Вы же редактировали статью?! Почему так получается?
Мне приходится переверстывать по половине журнала!

1. Основные принципы построения автоматизированной системы научных и инженерных расчетов термодинамических и оптических свойств плазмы

Исходя из реальных потребностей численного и физического моделирования и инженерного многофакторного анализа плазмохимических устройств и комплексов интерес представляют данные о групповом/ионизационном составе газо-плазменных активных сред; термодинамических характеристиках плазмы (давление, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, изобарные и изохорные теплоемкости, эффективный показатель адиабаты, скорость звука, уравнения состояния); оптических свойствах (коэффициенты поглощения в дискретном и непрерывном спектрах, интегральные коэффициенты поглощения и характерные интегральные длины пробега излучения); переносных (транспортных) свойствах плазмы (коэффициенты электро- и теплопроводности, диффузии, вязкости и др.). Получение информации по каждому из этих разделов — самостоятельная экспериментальная и расчетная задача, а результат — генерация соответствующих баз данных, совокупность которых по каждому разделу и формирует банки данных — компонент АСНИР ТОТ.

Формулируя задачу создания АСНИР ТОТ для определения теплофизических свойств плазмы сложного химического состава исходили из того, что заранее невозможно учесть всю номенклатуру используемых веществ и соединений, данные о которых могут потребоваться в конкретном инженерном анализе широкого спектра плазмохимических устройств и комплексов. Кроме того, такая система должна быть открытой для дальнейшего развития и модификации, позволять с малыми затратами заменять или добавлять новые физические методики расчета и анализа, позволять генерировать банки данных по термодинамическим, оптическим, переносным свойствам многокомпонентной плазмы на основе разработанного комплекса программ.

С учетом перечисленных требований при создании АСНИР ТОТ использовались принципы объектно-ориентированного программирования, основные положения которого: объединение в единое целое — объект — данных — называемых полями объекта, с обрабатывающими эти данные подпрограммами — называемыми методами объекта и наследование свойств объекта в его потомках, позволили, во-первых, в основу структуры АСНИР ТОТ положить иерархию предметной области и организовать соответствующее сопряжение программных компонент и баз данных, во-вторых, сделать АСНИР открытой для развития и модификации. В созданном программном комплексе предмет моделирования — плазма представлен несколькими уровнями детализации (рис. 1): верхний уровень — «смесь» как совокупность составляющих ее химических элементов, характеризуемая набором параметров (температура, плотность, давление). Следующий уровень — «элемент» (химический) как совокупность ионов различной кратности, характеризуемый своим набором параметров (атомный номер, вес). Далее следуют: «ион» как совокупность возможных энергетических состояний, «состояние», описываемое конфигурацией электронных оболочек, и «оболочка», характеризуемая набором квантовых чисел и количеством электронов. Каждому уровню детализации поставлен в соответствие базовый тип переменной — объект, объединяющий в себе поля и методы их обработки. На основе базовых объектов могут быть порождены объекты-потомки, наследующие необходимые свойства и методы предков и вносящие новые или модифицирующие старые свойства и методы. Все базовые объекты комплекса являются потомками стандартного объекта (Tobject), что облегчило организацию иерархической структуры данных в виде стандартных коллекций (объект Tcollection).

В качестве входных данных в АСНИР ТОТ используются: плотность, температура (или другие два независимых термодинамических параметра), элементный состав плаз-

мы, а также базы данных по энергетическим уровням атомов и ионов элементов, входящих в смесь. Выходными данными являются зависимости термодинамических функций, ионизационного состава и оптических свойств для диапазона входных данных, представляемые в удобном для анализа виде.

Логика расчетных процедур следующая: сначала инициализируется объект типа «смесь» заданием «входных данных» — состава смеси, диапазонов по температуре и плотности; затем используются методы этого объекта для расчета того или иного параметра или вывода результатов расчета. Например, расчет непрерывного спектра поглощения состоит из определения парциального вклада в сечение фотоионизации от различных элементарных процессов (см. ниже). С использованием разработанной структуры и программных компонентов АСНИР расчет состоит в инициализации необходимых методов на соответствующих уровнях детализации предметной области, при этом все необходимые данные автоматически рассчитываются и хранятся динамически в виде полей и методов объектов комплекса (рис. 1).

2. Базы данных по квантовомеханическим состояниям атомов и ионов элементов «ТОТ-состояния». Интерфейс АСНИР ТОТ с базами данных

Базы данных по энергетическим состояниям атомов и ионов элементов (БД «ТОТ-состояния») необходимы для определения статистических сумм, вероятностей радиационных переходов и сечений фотоионизации электронных оболочек. Степень наполнения таких баз данных определяется поставленной задачей. При расчете состава и термодинамических функций в идеально-газовом приближении достаточно ограничиться десятком низковозбужденных состояний, при определении непрерывного спектра поглощения можно также ограничиться несколькими низковозбужденными состояниями, влияние остальных учитывается интегрально [19]. Однако для определения дискретного спектра поглощения необходима обширная база данных по энергетическим уровням атомов и ионов; более точные методы расчета термодинамических и оптических свойств плазмы с учетом эффектов неидеальности также используют развитые данные по квантовомеханическим состояниям [10, 20]. Таким образом, генерируемые базы данных должны содержать большое количество записей по энергетическим уровням каждого иона каждого рассчитываемого элемента.

«ТОТ-состояния» представляют собой соответствующим образом сформатированные файлы для каждого элемента, в которых содержится структурированная информация по отдельному элементу. Внутри файла информация по энергетическим уровням разбита на следующие блоки: данные для атома (иона) — энергия ионизации основного состояния и смещенных термов — возбужденные состояния атома (иона). Данные по возбужденным состояниям содержат информацию по электронным оболочкам, набору квантовых чисел, энергии возбуждения.

Таким образом, используется иерархическая модель данных, представляющая собой древовидную структуру, где каждому уровню детализации предметной области (плазмы) соответствует «узел» в структуре данных (рис. 2), что позволяет достигнуть независимости программного продукта от базы данных и наоборот, а информационное представление БД «ТОТ-состояния» основано на принятой в спектроскопии систематике уровней атомных частиц [21, 22] и методах ее записи и имеет самостоятельное значение, поскольку может быть обобщением накопленных данных по энергетическим уровням атомов и ионов. Степень наполненности баз данных — не менее 100 состояний для атома и первых двух ионов (как правило, $\sim 10^3$) и порядка 10-100 состояний для многозарядных ионов.

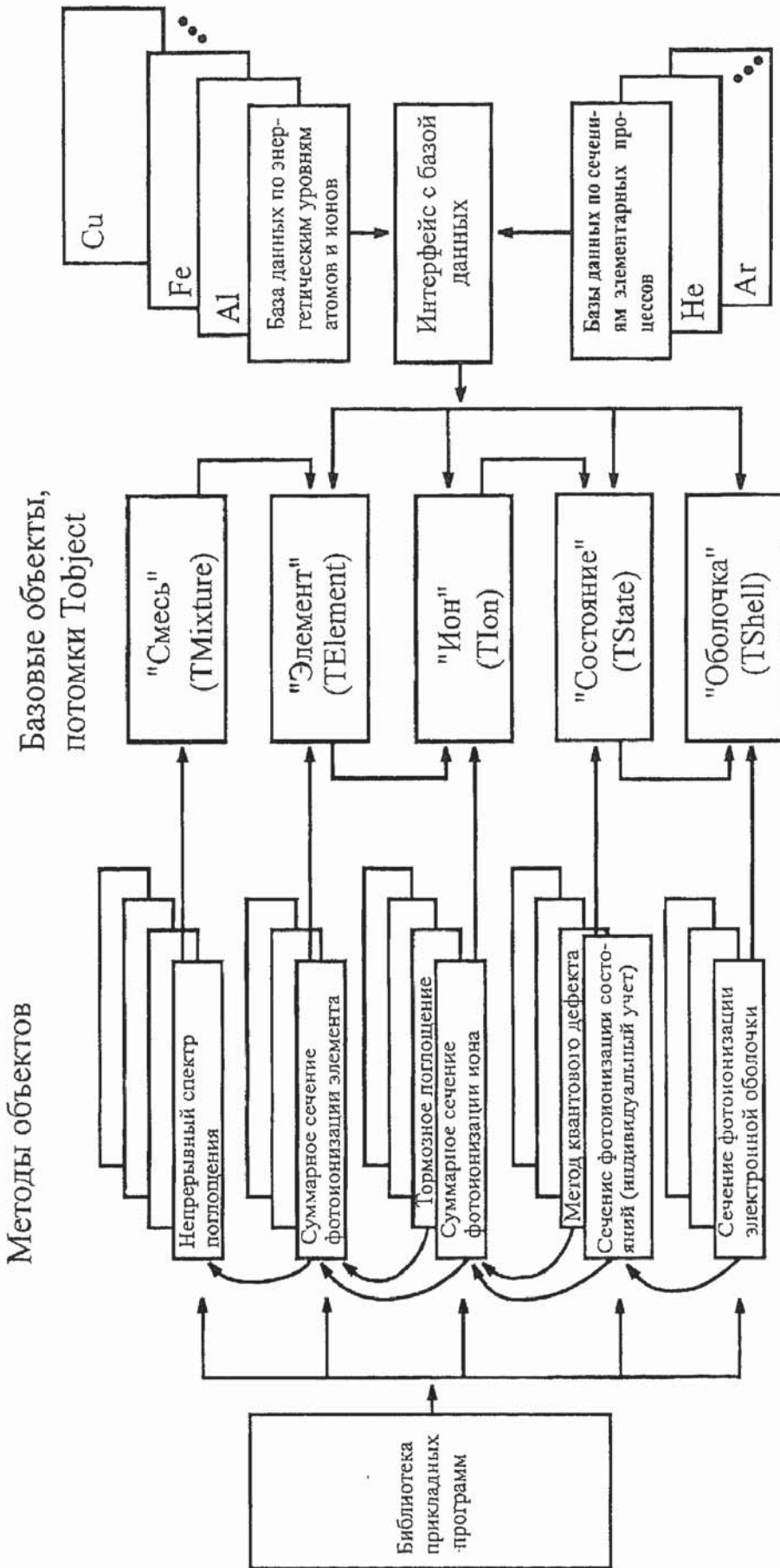


Рис. 1. Структурная схема АСНИР ТОТ — МГТУ

3. Базы данных по термодинамическим и оптическим свойствам атомарной плазмы сложного химического состава

АСНИР ТОТ обеспечивает расчет, формирование таблиц данных и генерацию баз данных по термодинамическим функциям, ионизационному составу, оптическим свойствам равновесной плазмы заданного произвольного химического состава, в заданных пользователем пределах температур и плотностей с заданным шагом. В настоящей рабо-

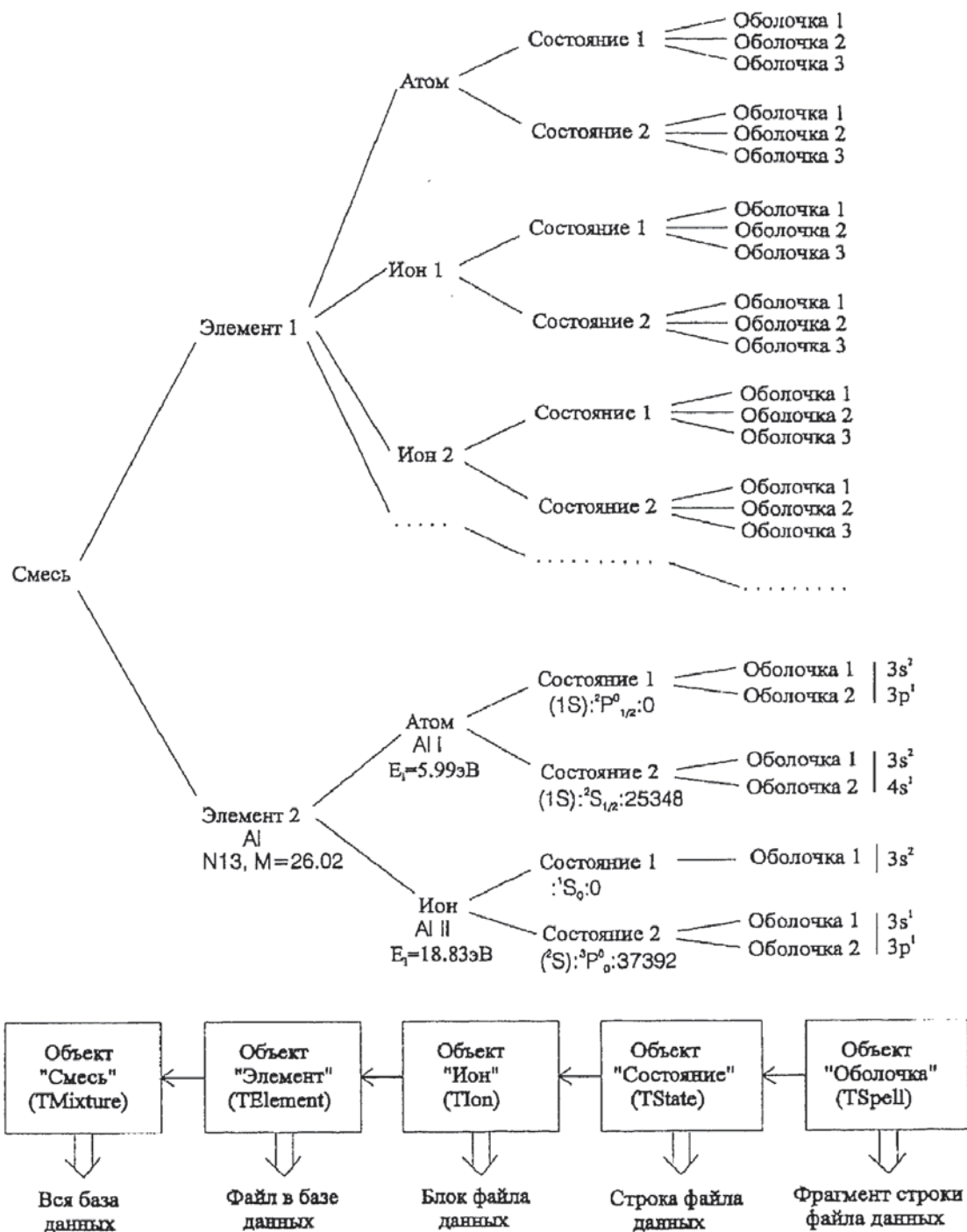


Рис. 2. Иерархическая структура базы данных по квантовомеханическим состояниям атомов и ионов (ТОТ-состояния) и ее сопряжения с базовыми объектами АСНИР ТОТ — МГТУ. Для элемента 2 показано заполнение полей базы данных на примере алюминия

те представлены соответствующие результаты для некоторых плазмообразующих элементов полимерного ряда.

Генерируемые базы данных по ионизационному составу, термодинамическим функциям — «ТОТ-термодинамика»; оптическим свойствам — «ТОТ-оптика» и сопряженные базы данных по длинам волн, силам осцилляторов и параметрам штарковского уширения для разрешенных дипольных переходов атомов и ионов — «ТОТ-линии» представляют собой набор структурированной информации в форме таблиц, графиков и текстовом формате.

Базы данных «ТОТ-термодинамика» включают в себя данные по ионизационному составу и термодинамическим свойствам (давление, внутренняя энергия, энтропия, энтальпия, изобарная и изохорная теплоемкости, эффективный показатель адиабаты, уравнения состояния, адиабатическая скорость, скорость звука) плазмы элементов полимерного ряда (С, О, N, F, Si, H) как функций от плотности и температуры (в диапазонах по плотности от 10^{-4} до 10^2 кг/м³ и температуры от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^6$ К) (рис. 3, 4), полученные расчетным путем; в доступных областях диаграммы ρ - T проведено сравнение представленных расчетных результатов генерируемой базы данных с экспериментальными и теоретическими данными [13, 14].

Подробный анализ методик расчета термодинамических свойств неидеальной плазмы, их сравнение и границы применимости обсуждаются в [15—18]. В АСНИР ТОТ расчет ионизационного состава и термодинамических функций плазмы проводится по системе уравнений Саха—Эккерта с учетом неидеальности плазмы в приближении Дебая—Хюккеля в большом каноническом ансамбле [10]

$$n_{z+1,A} n_{z,e} / n_z = 2 (u_{z+1,A} / u_{z,A}) (2\pi T)^{3/2} \exp(-I_{z,A}^* / T),$$

$$I_{z,A}^* = I_{z,A} - \Delta I,$$

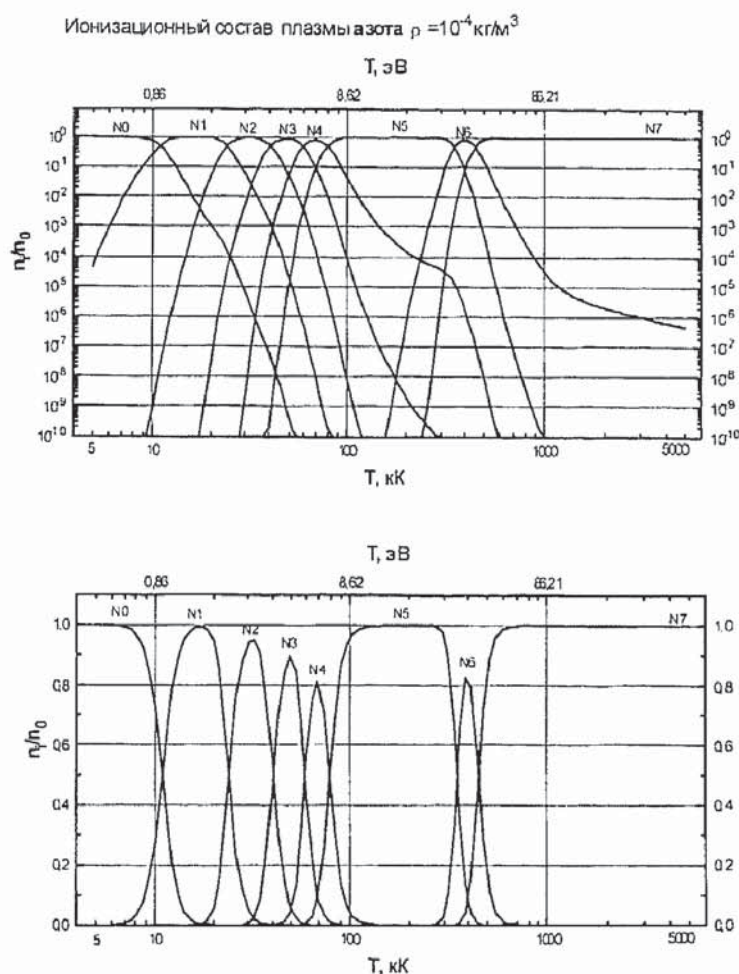
$$\Delta I = T \ln \left(\frac{(1 + (z+1)^2 \Gamma^* / 2) (1 + \Gamma^* / 2)}{1 + z^2 \Gamma^* / 2} \right),$$

$$\Gamma^{*2} = 4\pi T^{-3} \sum_s \frac{n_s z_s^2}{1 + z_s^2 \Gamma^* / 2},$$

где z — заряд иона; $n_{z,A}$, $I_{z,A}$, $u_{z,A}$ — соответственно концентрация, энергия ионизации, статистическая сумма иона элемента A ; A — атомарный номер элемента; C_A — процентное содержание ионов элемента в плазме; n_0 — полная концентрация атомов и ионов; ΔI — поправка на неидеальность энергии ионизации; Γ — критерий неидеальности. Статсуммы рассчитываются с использованием баз данных по энергетическим уровням атомов и ионов элементов, входящих в смесь, и «обрезанием» на среднем межчастичном расстоянии с введением экспоненциального форм-фактора [20].

Ограничения для использованных методик расчета: вырождение электронной компоненты плазмы при дальнейшем увеличении плотности при низких температурах; высокая неидеальность плазмы ($\Gamma > 1$); отклонения от состояния локального термодинамического равновесия, приводящие к невозможности использования уравнения Саха (например, в случае «коронарного предела») [5].

Базы данных «ТОТ-линии» по параметрам разрешенных оптических (дипольных) переходов (длина волны, сила осцилляторов, параметры штарковского уширения в поглощении) атомов и ионов содержат следующие данные для каждого разрешенного дипольного перехода: электронная конфигурация нижнего состояния; электронная конфигурация верхнего состояния; спиновой, орбитальный, полный моменты и четность ниж-

Рис. 3. Ионизационный состав плазмы азота при плотности 10^{-4} кг/м^3

него состояния; спиновой, орбитальный, полный моменты и четность верхнего состояния; энергия нижнего и верхнего состояний в см^{-1} ; длина волны перехода в \AA ; сила осциллятора; параметры штарковского уширения.

Для генерации этих баз данных используются базы данных «ТОТ-состояния». Расчет проводится методом Бейтса—Дамгаард [23] для всех возможных разрешенных переходов между приведенными в базе данных уровнями и определяются параметры ударного уширения спектральных линий электронами в приведенном (не зависящем от T и ρ) виде [13, 14].

Базы данных «ТОТ-оптика» включают в себя результаты расчета оптических свойств атомарной многокомпонентной слабонеидеальной плазмы элементов полимерного ряда и их смесей как функции от энергии квантов, плотности и температуры (в диапазонах плотностей 10^{-4} – 10^2 кг/м^3 , температур $5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^6 \text{ К}$ и энергий квантов 10^{-1} – 10^3 эВ) в виде коэффициента поглощения в непрерывном спектре, суммарных спектров поглощения, многогруппового осреднения спектра по Планку и Расселанду, многогруппового осреднения с учетом оптической толщины среды (рис. 5). Для генерации расчетных баз данных используются базы данных по энергетическим уровням атомов и ионов «ТОТ-состояния» и базы данных по длинам волн, силам осцилляторов и параметрам штарковского уширения для разрешенных дипольных переходов «ТОТ-линии». Расчет проводится при определении парциального вклада в суммарный коэффициент поглощения от элементарных радиационных процессов: связанно-связанных (bb), связанно-свободных (bf) и свободно-свободных (ff) переходов [24]. Расчет сечений свободно-свободных переходов проводится по фор-

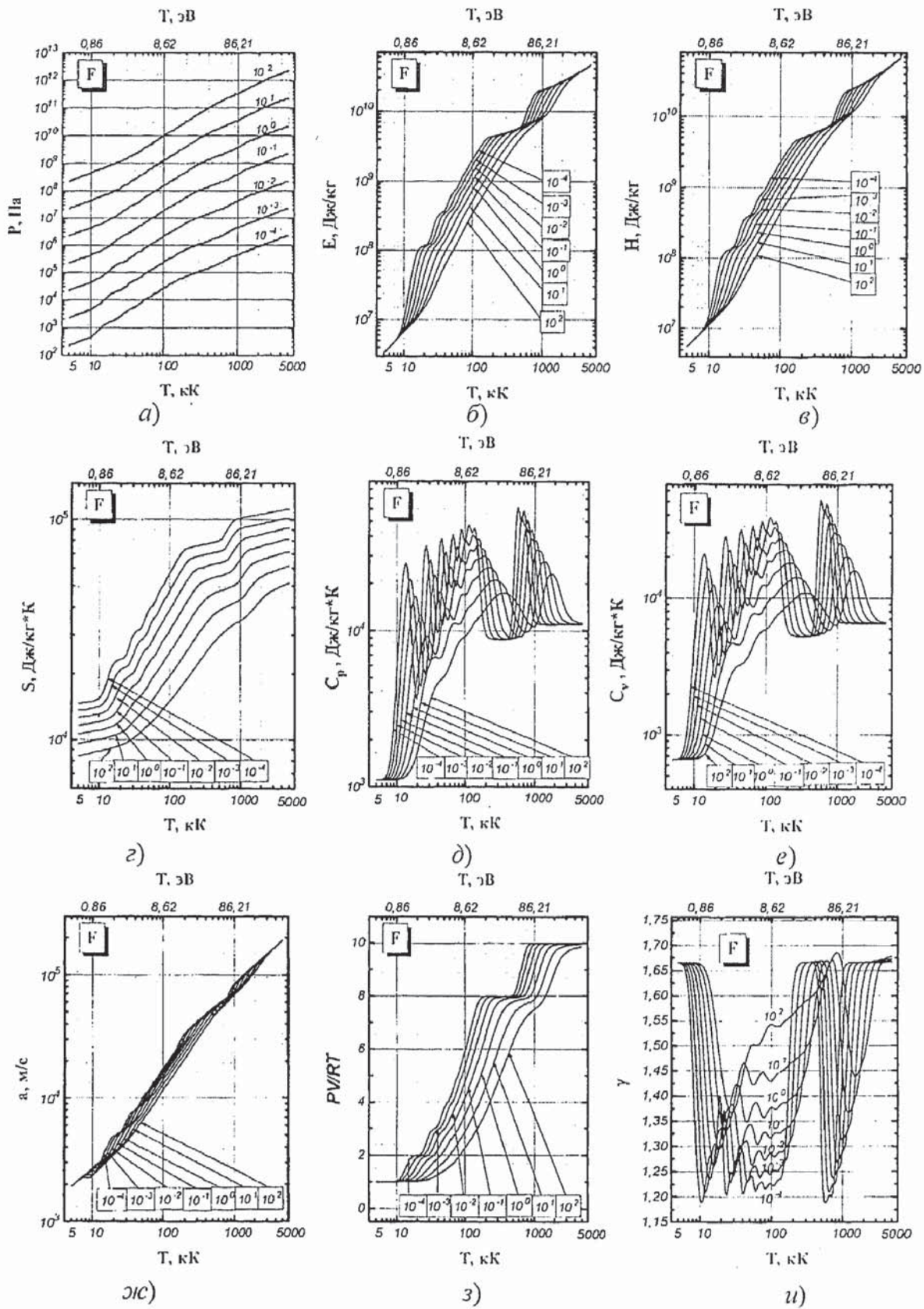


Рис. 4. Термодинамические характеристики плазмы фтора: *a* — давление; *б* — удельная внутренняя энергия; *в* — удельная энтальпия; *г* — удельная энтропия; *д* — удельные изобарная и изохорная теплоемкости; *ж* — эффективный показатель адиабаты; *з* — адиабатическая скорость звука; *и* — термическое уравнение состояния (цифры в поле графиков означают плотность, кг/м³)

мулам Крамерса с учетом фактора Гаунта [19] (тормозное поглощение).

$$\sigma_{z,A}^{ff} = \frac{4}{3} \left[\frac{2\pi}{3m_e kT} \right]^{1/2} \frac{(z-1)^2 e^6}{hcm_e v^3} n_e G(v, T),$$

$$G = \sum_{qr} a_{qr} (\lg T)^q (\lg \lambda)^r, \quad q, r = 1, 2, 3; \lambda = c/v,$$

где $\sigma_{z,A}^{ff}$ — сечение тормозного поглощения в пересчете на один ион, $G(v, T)$ — множитель Гаунта.

Расчет парциального вклада от сечений связанно-свободных переходов разделяется на индивидуальный учет сечений фотоионизации основных, низковозбужденных состояний и внутренних оболочек по оригинальной методике [7, 8]

$$\sigma_{nl}(hv) = \sigma_0 F(y), \quad y = hv / \epsilon_0,$$

$$\epsilon_0 = \sum_{i=1}^2 \left[A_i(nl, z)(z - N + 1)^i \right], \quad \frac{N_{nl}}{\sigma_0} = \sum_{i=1}^2 B_i(nl, z)(z - N + 1)^i,$$

где F_{nl} — функция, одинаковая для всевозможных z и N , но разная для различных оболочек; N_{nl} — число электронов у данного атома или иона на оболочке nl . Конкретный вид функций F_{nl} для оболочек 2s-3p и значения коэффициентов A_i^{nl} и B_i^{nl} приведены в [7, 8].

Учет сечений фотоионизации возбужденных состояний приводится по методу квантового дефекта [23]

$$Q^{\text{МКД}} = 5,45 \cdot 10^{-19} \frac{v^3}{\xi^2 \alpha(v, l) (1 + \epsilon v^2)^3} \sum_{l'=l \pm 1} C_{l'} \left| G(vl, \epsilon' l') \cos \left\{ \pi \left[v + \chi(vl, \epsilon' l') + \Delta(\epsilon') \right] \right\} \right|^2,$$

где $C_{l'} = l \max / (2l + 1)$; $\epsilon' = (E / Ry) / Z^2$; v — эффективное главное квантовое число для уровня дискретного спектра. Функции $G(vl, \epsilon' l')$ и $\chi(vl, \epsilon' l')$ для переходов $l - l'$ приводятся в [23], $\Delta(\epsilon')$ — экстраполированное на непрерывный спектр значение квантового дефекта $\Delta_{l'} = n_{l'} - v_{l'}$, ξ — спектроскопический символ иона.

Интегральный учет фотоионизации высоковозбужденных состояний приводится по формулам Бибермана—Нормана с учетом поправки на сдвиг порогов фотоионизации по Инглису—Теллеру [19].

Вклад от i -го иона в общий коэффициент поглощения

$$k_{vi} = x_i (\sigma_i^{ff} + \sigma_i^{bb} + \sigma_i^{bf}),$$

а суммарный коэффициент поглощения смеси

$$k_v^{\Sigma} = n_0 [1 - \exp(-hv/kT)] \sum_A \sum_i k_{vi},$$

где суммирование по всем ионам всех химических элементов, входящих в смесь, а фактор $[1 - \exp(-hv/kT)]$ учитывает вынужденное испускание.

Расчет дискретного спектра коэффициентов поглощения (линейчатый спектр) проводится с использованием базы данных «ТОТ-линии», профиль линий считается лоренцевским с уширением за счет квадратичного штарк-эффекта (ударное уширение электронами).

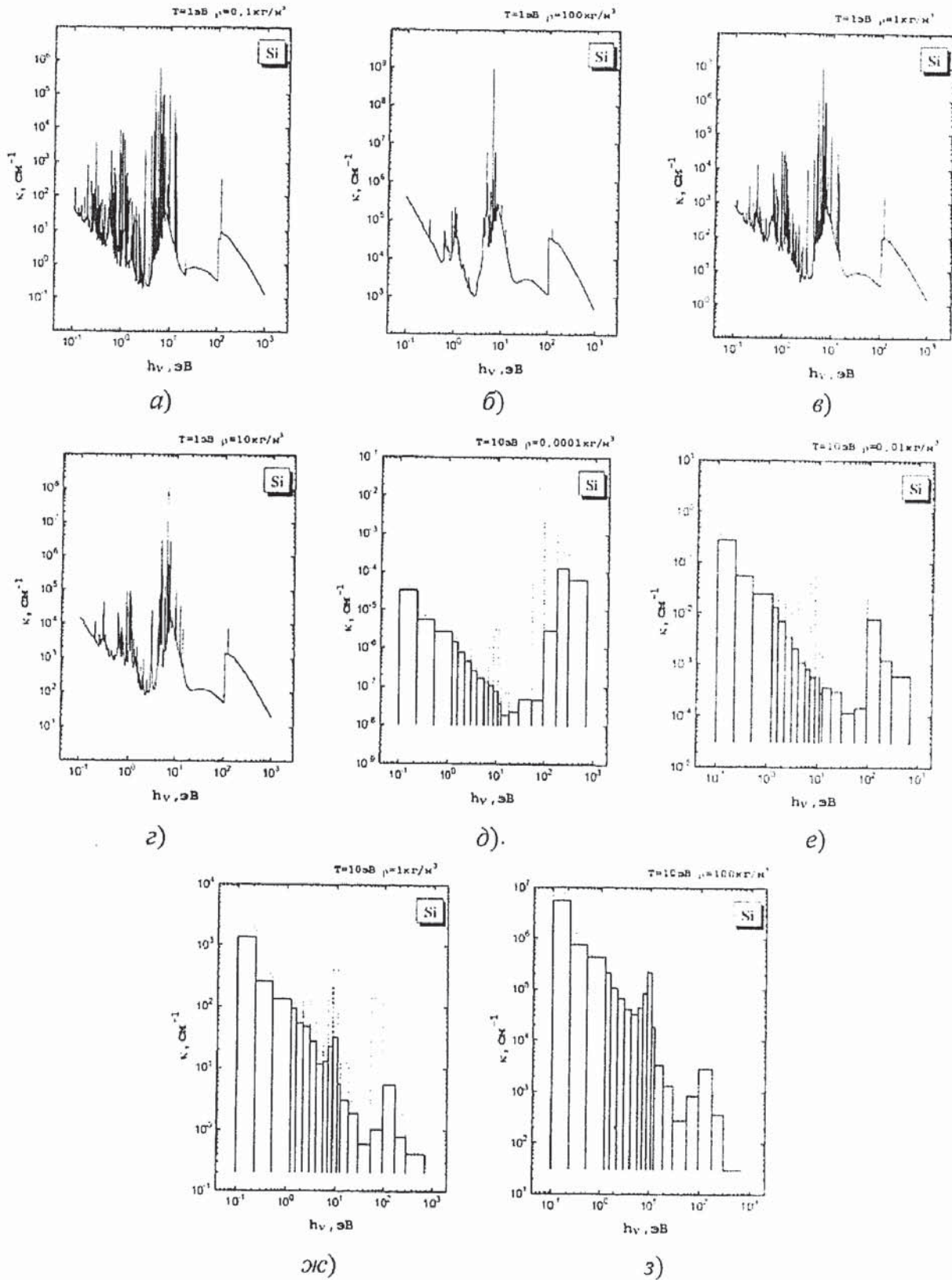


Рис. 5. Оптические характеристики кремния: а—г — суммарный спектр коэффициента поглощения плазмы кремния для разных значений T и ρ , д—з — многогрупповое осреднение спектра поглощения кремния, по Росселанду — сплошная линия, по Планку — пунктир

Основные трудности при решении задач переноса излучения связаны с анализом эмиссионных спектров с многочисленными линиями, когда в узком частотном интервале значения коэффициентов поглощения изменяются на несколько порядков многократно, при этом каждая линия имеет достаточно сложный контур. Дискретный спектр поглощения даже одного элемента содержит порядка $10^4 - 10^5$ линий, на описание профиля каждой из которых требуется от 7 до 10^2 точек. Суммарное число точек в рассчитанной спектральной зависимости коэффициента поглощения может превышать 10^8 (для одной пары значений T и ρ). Выходов из этой ситуации два: первый — создание «замкнутой» программной системы, т.е. системы, которая бы использовала не результаты, а сами методы комплекса АСНИР ТОТ (или весь комплекс) в цикле расчетов, что позволяет не создавать банки данных по коэффициентам поглощения и повышает точность расчетов, второй — использование приближенных методик аппроксимации спектра излучения.

4. Обобщенные методики и тестовые результаты расчетов термодинамических и оптических свойств плазмы элементов полимерного ряда

Разработанный комплекс методов расчета и программных компонент АСНИР ТОТ позволяет определять: парциальный состав и термодинамические функции, непрерывные и дискретные спектры, групповые и интегральные радиационные характеристики атомарной плазмы широкой номенклатуры плазмообразующих элементов и их смесей в широком диапазоне изменения температуры ($1 - 10^2$ эВ и выше), плотности ($10^{-4} - 10^2$ кг/м³), энергии квантов ($10^{-1} - 10^3$ эВ) и характерного размера плазменного объема ($10^{-2} - 10^3$ см), при этом входная информация — только температура, плотность, элементный состав плазмы и база данных по квантовомеханическим состояниям атомов и ионов, входящих в смесь. Логика расчетных процедур следующая: после инициализации баз данных «ТОТ-состояния» определяется парциальный состав, затем в зависимости от выбранного варианта — термодинамические функции, непрерывный или суммарный спектр коэффициента поглощения и групповые средние и интегральные радиационные характеристики.

Некоторые результаты массовых расчетов ионизационного состава, термодинамических и оптических свойств для плазмы элементов полимерного ряда (N, F, Si) приводятся на рис. 3—5 и иллюстрируют ионизационный состав плазмы азота, термодинамические характеристики плазмы фтора в диапазоне температур $5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$ К с шагом в логарифмических координатах $\lg \Delta T = 0,3$ и плотности от 10^{-4} до 10^2 кг/м³ с шагом, при этом $\lg \Delta \rho = 1$ и результаты расчета суммарного спектра поглощения и его осреднение по Планку и Росселанду в многогрупповом приближении для плазмы кремния в нескольких точках по T и ρ и диапазоне энергий квантов $10^{-1} - 10^3$ эВ с переменным шагом, при этом профиль линии рассчитывался по 20 точкам, исходя из следующих условий: 1) коэффициент поглощения в центре линии больше 20% коэффициента поглощения в непрерывном спектре; 2) полная ширина линии определяется условием $k_{\nu_{л}}(\nu_1) < 0,1k'_{\nu_{л}}(\nu_1)$ и $k'_{\nu_{л}}(\nu_2) < 0,1k'_{\nu_{л}}(\nu_2)$, где $[\nu_1, \nu_2]$ — отрезок, на котором рассчитывался коэффициент поглощения ($k'_{\nu_{л}}$) в линии, $k'_{\nu_{л}}(\nu_i)$ — коэффициент поглощения в непрерывном спектре; 3) интервал $[\nu_1, \nu_2]$ разбивается на 20 точек с шагом в логарифмических координатах с основанием логарифма $(\nu_2 - \nu_1)/\gamma_L$, γ_L — лоренцовская полуширина спектральной линии. После этого, если выполнено первое условие, проводилось аддитивное наложение линии на итоговый спектр.

Следует отметить, что параметры спектральных линий, данные по парциальному составу, термодинамическим функциям и базы данных по квантовомеханическим состояниям атомов и ионов представляют самостоятельный научный и практический интерес. Срав-

нение доступных экспериментальных и расчетных данных, проведенное в диапазоне параметров — плотностей (10^{-4} - 10^2 кг/м³) и температур (0,5—30 эВ) для ряда плазмообразующих элементов, показывает их удовлетворительное соответствие, что позволяет предложить программный комплекс АСНИР ТОТ в качестве инструмента надежного экспресс-анализа термодинамических и оптических свойств плазмы широкого ряда активных с низкотемпературной плазмой сред плазмохимических и технологических установок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оптические свойства горячего воздуха / И.В. Авилова, Л.М. Биберман, В.С. Воробьев и др. — М.: Наука, 1970. — 320 с.
2. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. — М.: Машиностроение, 1965. — 463 с.
3. Таблицы термодинамических функций воздуха: Для температур от 12000 до 20000 К и давлений от 0,001 до 1000 атмосфер / А.С. Предводителев, Я.В. Ступоченко, А.С. Плешанов и др.; Под ред. А.С. Предводителева. — М.: Изд-во ВЦ АН СССР, 1959. — 230 с.
4. Кобзев Г. А., Нужный В. А. Оптические свойства воздушной плазмы с учетом спектральных линий, $T=20000$ - 300000 К / ИВТАН СССР. — Препринт № 1-134. — М., 1984. — 56 с.
5. Состав и термодинамические функции плазмы; Справочник / Б.В. Замышляев, Е.Л. Ступицкий, А.Г. Грузь, В.Н. Жуков. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 144 с.
6. Радиационные свойства газов при высоких температурах / В.А. Каменщиков, Ю.А. Пластинин, В.М. Николаев, Л.А. Новицкий. — М.: Машиностроение, 1971. — 440 с.
7. Термодинамические и оптические свойства ионизованных газов при температурах до 100 эВ / Ю.П. Бойко., Ю.С. Протасов, С.Н.Чувашев и др.; Под ред. Ю.С.Протасова. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 192 с.
8. Термодинамические и оптические свойства плазмы металлов и диэлектриков / Ю.П. Бойко., Ю.С. Протасов, С.Н.Чувашев и др.; Под ред. Ю.С. Протасова. — М.: Металлургия, 1988. — 356 с.
9. Калиткин Н. Н., Кузьмина Л. В., Рогов В. С. Таблицы термодинамических функций и транспортных коэффициентов плазмы. — М.: Изд. ИПМ АН СССР, 1972. — 112 с.
10. Теплофизические свойства рабочих сред газозазадного ядерного реактора. / В.К. Грязнов, И.Л. Иосилевский Ю.Г.Красников и др.; Под ред. В.М. Иевлева. — М.: Атомиздат, 1982. — 304 с.
11. Thermodynamics and optical properties of plasma metals and dielectrics. / Ed. by Yu.S.Protasov. — NY: Hemisphere Publ. Corp., 1996. — 407 p.
12. Optical properties of ionized gases at temperature up to 100 eV. / Ed. by Yu.S.Protasov. — NY: Hemisphere Publ. Corp., 1997. — 321 p.
13. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т.1 / Под ред. Ю.С. Протасова. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. — 640 с.
14. Протасов Ю. Ю., Телех В. Д. Термодинамические, оптические и транспортные свойства рабочих веществ плазменных и фотонных энергетических установок. Т.2 / Под ред. Ю.С. Протасова. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. — 720 с.
15. Волокитин В. С., Голосной И. О., Калиткин Н. Н. Широкодиапазонное уравнение состояния вещества. I. Анализ моделей неидеальности // Известия вузов. Физика. — 1994. — Т. 37. — № 11. — С. 23.
16. Волокитин В. С., Голосной И. О., Калиткин Н. Н. Широкодиапазонное уравнение состояния вещества. II. Микрополевая модель // Известия вузов. Физика. — 1994. — Т. 38. — № 4. — С. 11.
17. Бушман А. В., Фортон В. Е. Модели уравнения состояния вещества // Успехи физических наук. — 1983. — Т. 40. — № 2. — С. 177.
18. Калиткин Н. Н. Модели вещества в экстремальном состоянии // Математическое моделирование: физико-химические свойства вещества. — М.: Наука, 1989. — С. 114.
19. Биберман Л. М., Норман Г. Э. Непрерывные спектры атомарных газов и плазмы // Успехи физических наук. — 1967. — Т. 91. — № 2. — С. 193.
20. Волокитин В. С., Калиткин Н. Н. Модели статистических сумм атомов и молекул // Математическое моделирование. — 1991. — Т. 3. — №. 5. — С. 49—60.
21. Moore C. E. Atomic Energy Levels. — Washington: National Bureau of Standards. Circular 467. — Vol. 1. — 1949. — 309 p.; Vol. 2. — 1952. — 227 p.; Vol. 3. — 1958. — 245 p.
22. Moore C. E. Selected Tables of Atomic Spectra, Atomic Energy Levels and Multiplet Tables. Washington: NBS. — 1965—1980. — 10 V.
23. Соболевман И. И. Введение в теорию атомных спектров. — М.: Наука, 1977. — 320 с.
24. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Кн. I. / Под ред. В.Е.Фортова. — М.: Наука, 2001. — 586 с.