

Параллельный алгоритм трассировки для численного моделирования поглощения лазерного излучения в плазме



Котельников А. М., Цыгвинцев И. П., Якобовский М. В., Гасилов В. А.

ИПМ им. Келдыша РАН

Радиационная газовая динамика

Методы радиационной газовой динамики используются при решении широкого круга актуальных задач в таких областях исследований, как динамика спускаемых КА, материаловедение, физика экстремальных состояний вещества, физика сильноточных разрядов и лазерной плазмы.

Система уравнений газовой динамики записывается в форме балансных уравнений:

- уравнение непрерывности
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) = 0$$

- уравнение движения
$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \operatorname{div}(p \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = \operatorname{grad} P + \operatorname{div}(\hat{\tau})$$

- уравнение баланса энергии
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \varepsilon \mathbf{V}) = -P \operatorname{div} \mathbf{V} - \operatorname{div} Q - G_{Rad} + \Phi$$

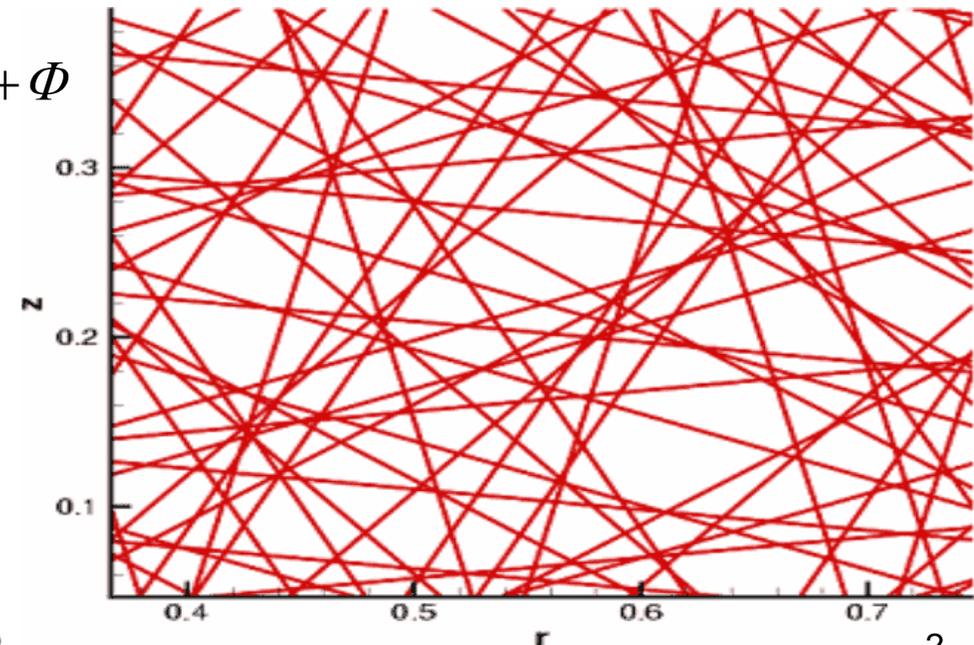
$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_{\nu}}{\partial t} + (\vec{\Omega}, \vec{V}) I_{\nu} = \kappa_{\nu} (I_{\nu \text{ равн}} - I_{\nu})$$

$I_{\nu} = I_{\nu}(\vec{r}, \vec{\Omega}, t)$ – интенсивность излучения

$\kappa_{\nu} = \kappa_{\nu}(\vec{r}, t)$ – оптическая плотность

$I_{\nu \text{ равн}} = I_{\nu \text{ равн}}(\vec{r}, t)$ – равновесная интенсивность

Фрагмент сетки лучей, построенных для 12-и угловых направлений



Общее решение уравнения переноса вдоль характеристики в излучающей и поглощающей среде

$$I_{\nu}(s) = I_{\nu}(s_0)e^{-K_{\nu}(s_0,s)} + \int_{s_0}^s \overbrace{\kappa_{\nu}(s')I_{\nu \text{ равн}}(s')}^{\text{излучение}} \underbrace{e^{-K_{\nu}(s',s)}}_{\text{поглощение}} ds'$$

где величина оптического пути $K_{\nu}(s_1, s_2) = \int_{s_1}^{s_2} \kappa_{\nu}(s') ds'$

$I_{\nu} = I_{\nu}(s)$ – интенсивность излучения

$\kappa_{\nu} = \kappa_{\nu}(s)$ – оптическая плотность

$I_{\nu \text{ равн}} = I_{\nu \text{ равн}}(s)$ – равновесная интенсивность излучения

Сеточно-характеристическая схема для расчета переноса излучения с учетом углового распределения

Ставится задача построения одномерных сеток на лучах без артефактов, при соблюдении топологии исходной неструктурированной сетки

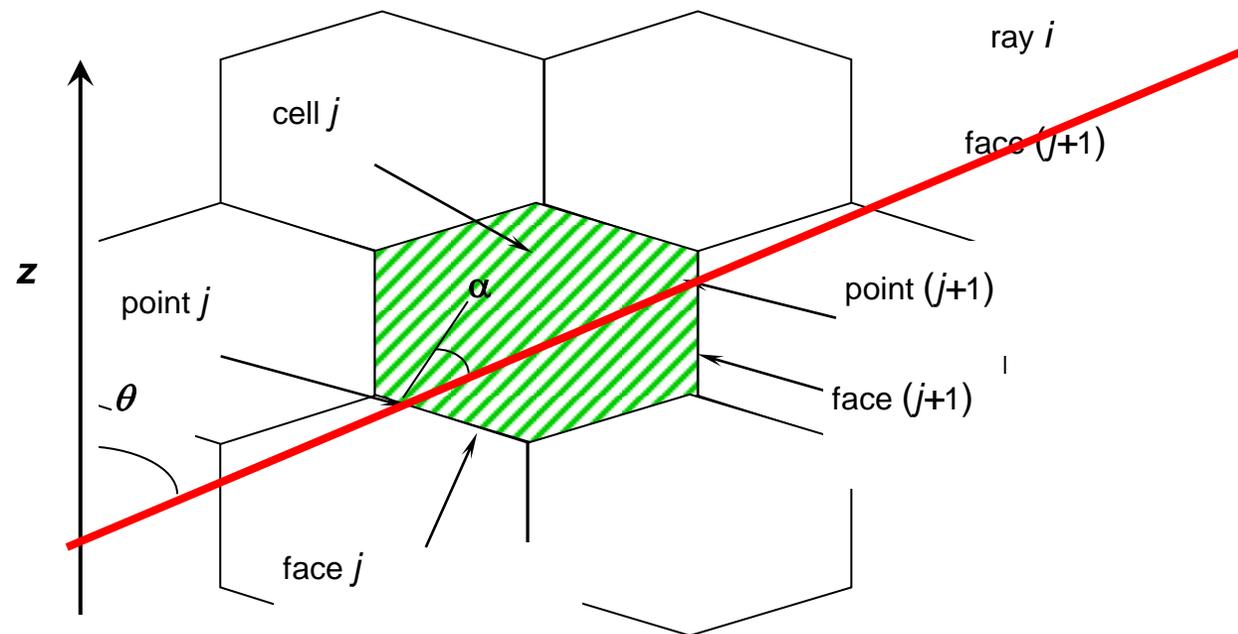
Оценка сложности для 3D сетки контрольных объемов $N \sim 10^7$

Число лучей $\sim N^2$

Число групп по частотам порядка $\sim 10^3$

Общая сложность $10^3 N^{2\frac{1}{3}} \sim 10^{19}$

Пересечение луча с сеткой контрольных объемов



Вычисление отрезка пересечения прямой и тетраэдра

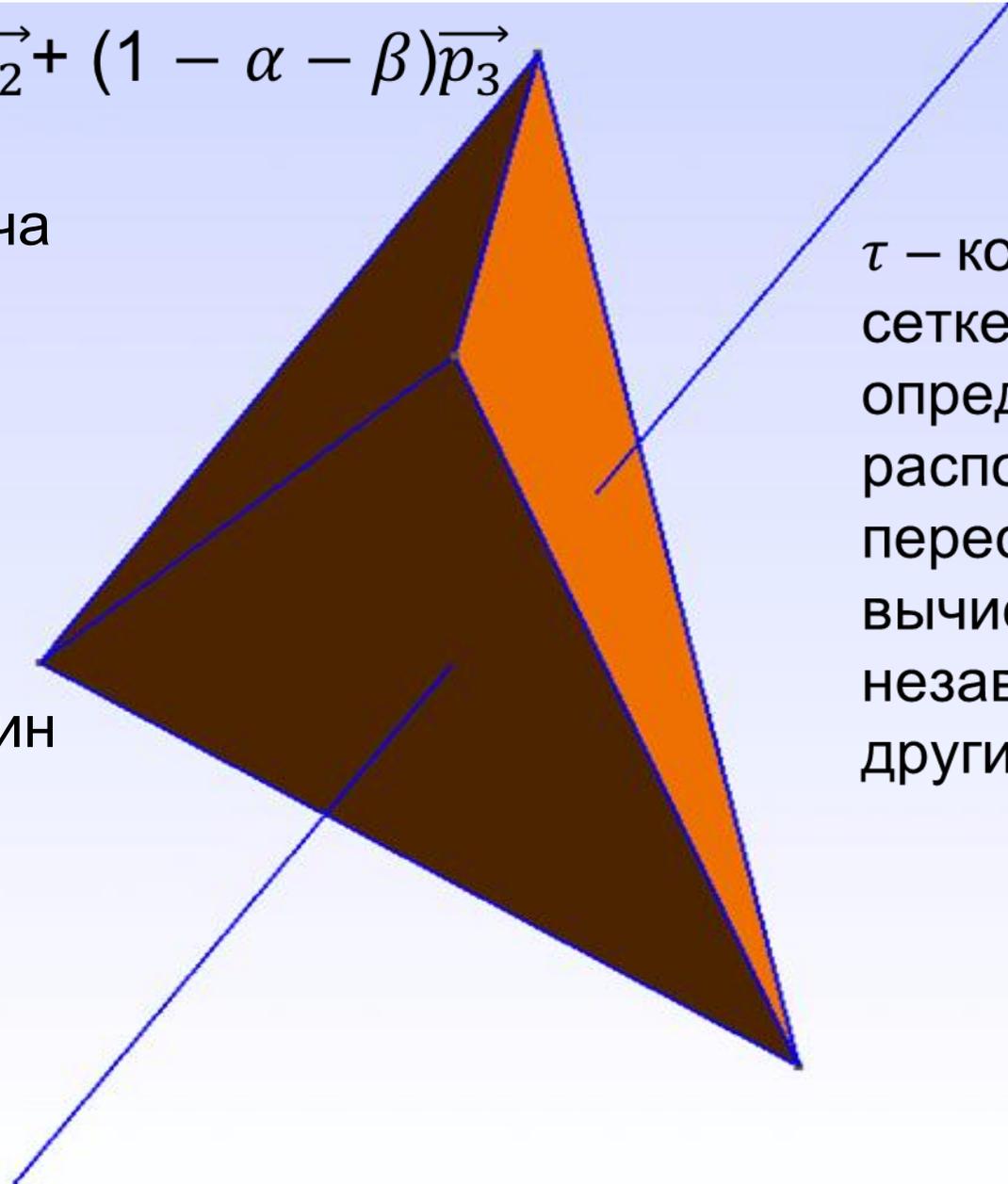
$$\vec{r} + \vec{c}\tau = \alpha\vec{p}_1 + \beta\vec{p}_2 + (1 - \alpha - \beta)\vec{p}_3$$

r – начало луча

c – направление луча

p_i – вершины
треугольника

α, β –
барицентрические
координаты точки
пересечения
относительно вершин
треугольника



τ – координата на одномерной сетке, применяемая для определения взаимного расположения отрезков пересечения. Данная величина вычисляется точно и независимо от хода расчета на других треугольниках

Применение рациональных чисел на базе длинной арифметики

- Гарантия получения точного результата во время вычислений
- Упрощение отладки и облегчения труда разработчика:
- Перенос формул в код без дополнительных изменений
- Линейность кода – отсутствие побочных ветвей условных переходов, что упрощает тестирование
- Используется сторонняя реализация арифметики длинных чисел `sBigNumber` [Р. Н. Шакиров / Институт машиноведения УрО РАН / www.imach.uran.ru/cbignum/papers/cb2009p.htm]

Цена применения рациональных чисел

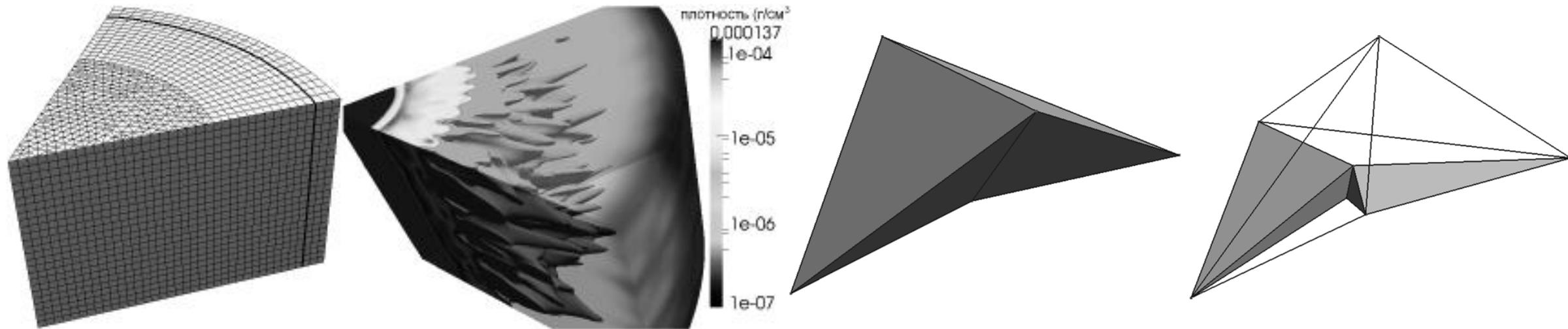
- Дополнительные затраты динамической памяти ограничены и полностью определяются разрядностью входных данных и последовательностью арифметических операций и не зависят от геометрии и топологии сетки
- Например, если начальная разрядность числителя n , а знаменателя m , то максимальная разрядность координаты вдоль луча $6 + 3n + 57m$ при максимальной промежуточной разрядности $6 + 3n + 87m$

Реализация алгоритма трассировки в MARPLE3D

- Пакет прикладных программ магнитной радиационной газовой динамики MARPLE3D (ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, 2011) разработан для решения на высокопроизводительной вычислительной технике задач *радиационной газовой динамики*, для которых *учет лучистого переноса энергии* имеет принципиальное значение.
- MARPLE3D реализует современные методы расчета лучистого теплообмена (напр., многогрупповое диффузионное приближение, модель на основе самосопряженного уравнения переноса) (высокотемпературная сильноизлучающая плазма).
- MARPLE3D позволяет выполнять расчеты динамики теплопроводного газа (плазмы) на неструктурированных сетках (тетраэдральные, гексаэдральные, призматические и их комбинации).

Внедрение трассировки в код MARPLE3D целесообразно, поскольку открывает возможность изучения задач радиационной газодинамики в новых постановках, уточнения расчетов лучистого переноса энергии в средах с существенно неоднородной по пространству оптической плотностью, внедрения удобной для сравнения с экспериментальными данными постобработки результатов расчета и т.д.

Изначально алгоритм трассировки был разработан для тетраэдральных сеток. Для реализации алгоритма трассировки в коде MARPLE была проделана работа по его обобщению на сетки, построенные из других элементов или их комбинаций. Кроме того, реализована параллельная версия трассировки.



Пример блочной сетки в цилиндрическом секторе
Расчет развития гидродинамической
неустойчивости на периферии сжимаемой
плазменной оболочки (сетка ~ 4 млн ячеек)

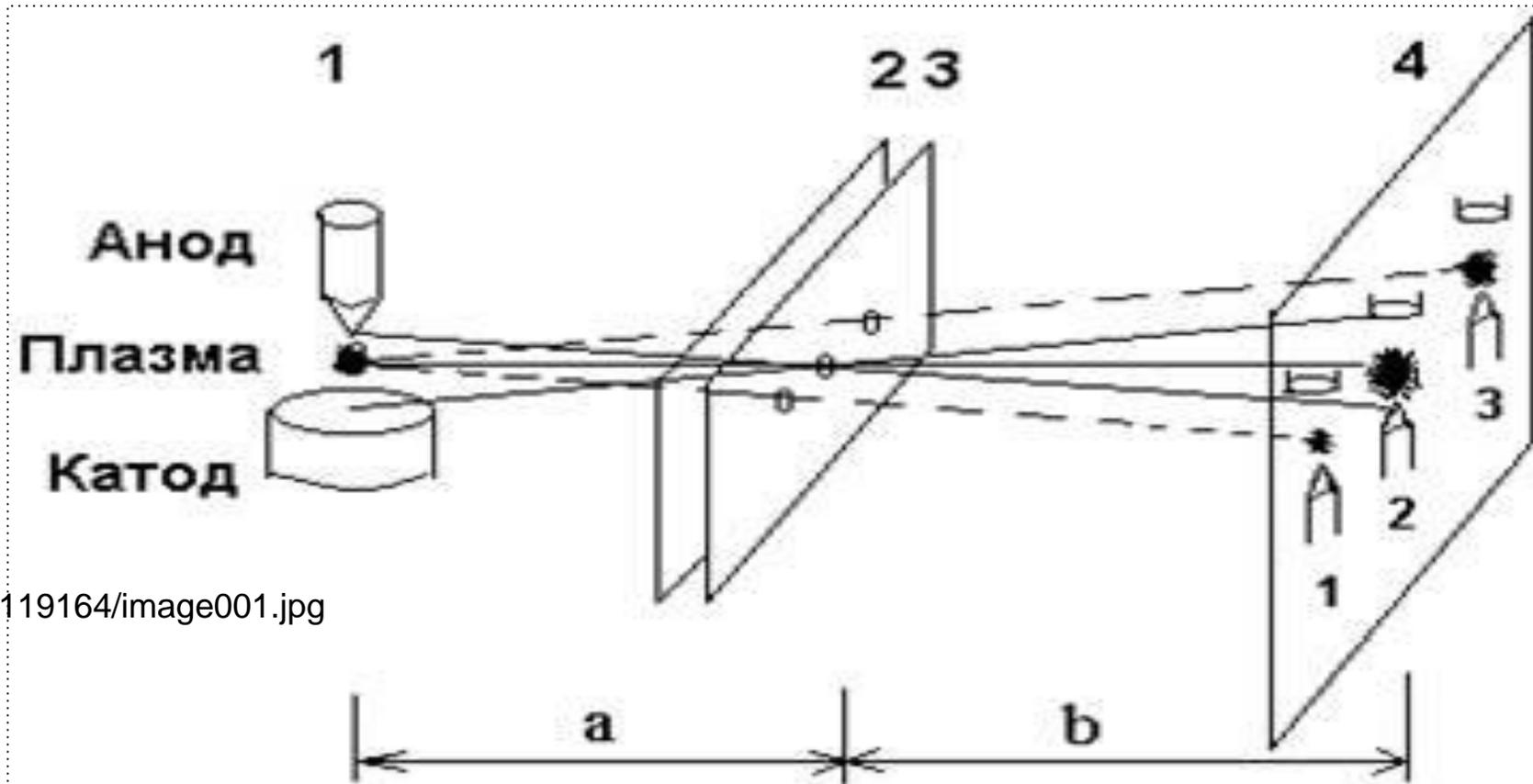
Пример тетраэдризации
четырёхугольной призмы

звёздчатой

Приложения алгоритма трассировки

К дополнительным задачам, решаемым данным алгоритмом относятся:

- постобработка результатов расчета, а также диагностика хода расчета
- моделирование работы камеры-обскуры (на илл.) для получения обскурোগрам для сравнения с экспериментом

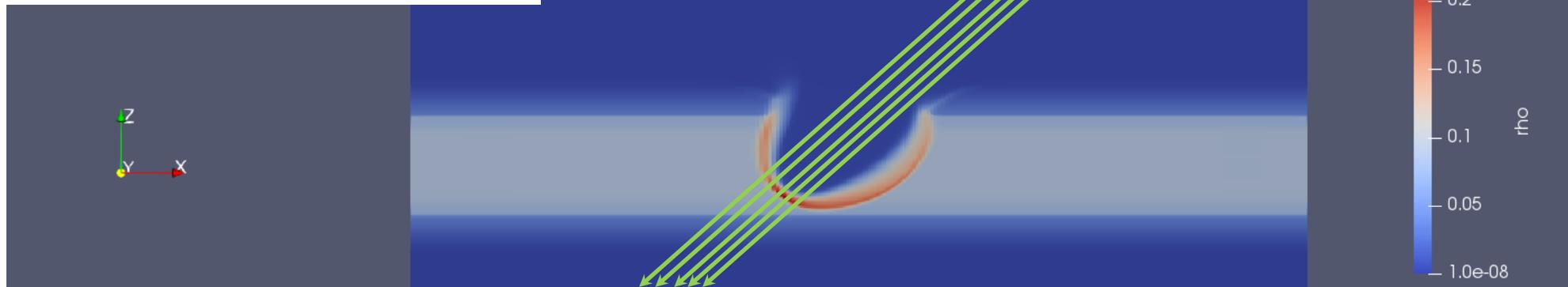


studbooks.net/imag_/43/119164/image001.jpg

Нагрев вещества энергией лазерного излучения

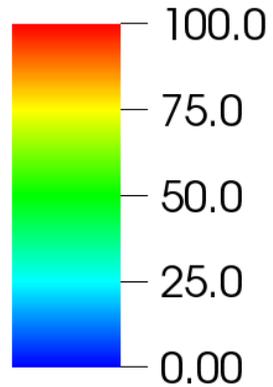
- Апробация алгоритма трассировки. Задача о нагреве криогенной мишени энергией лазерного излучения.
- Приложения – ускорение ионов, генерация потоков жесткого излучения (гамма-кванты) и др.
- Цель выполненных расчетов – анализ состояния мишени после нагрева предимпульсом фемтосекундного лазера.

Распределение плотности мишени из конденсированного водорода перед окончанием лазерного импульса, г / см куб.

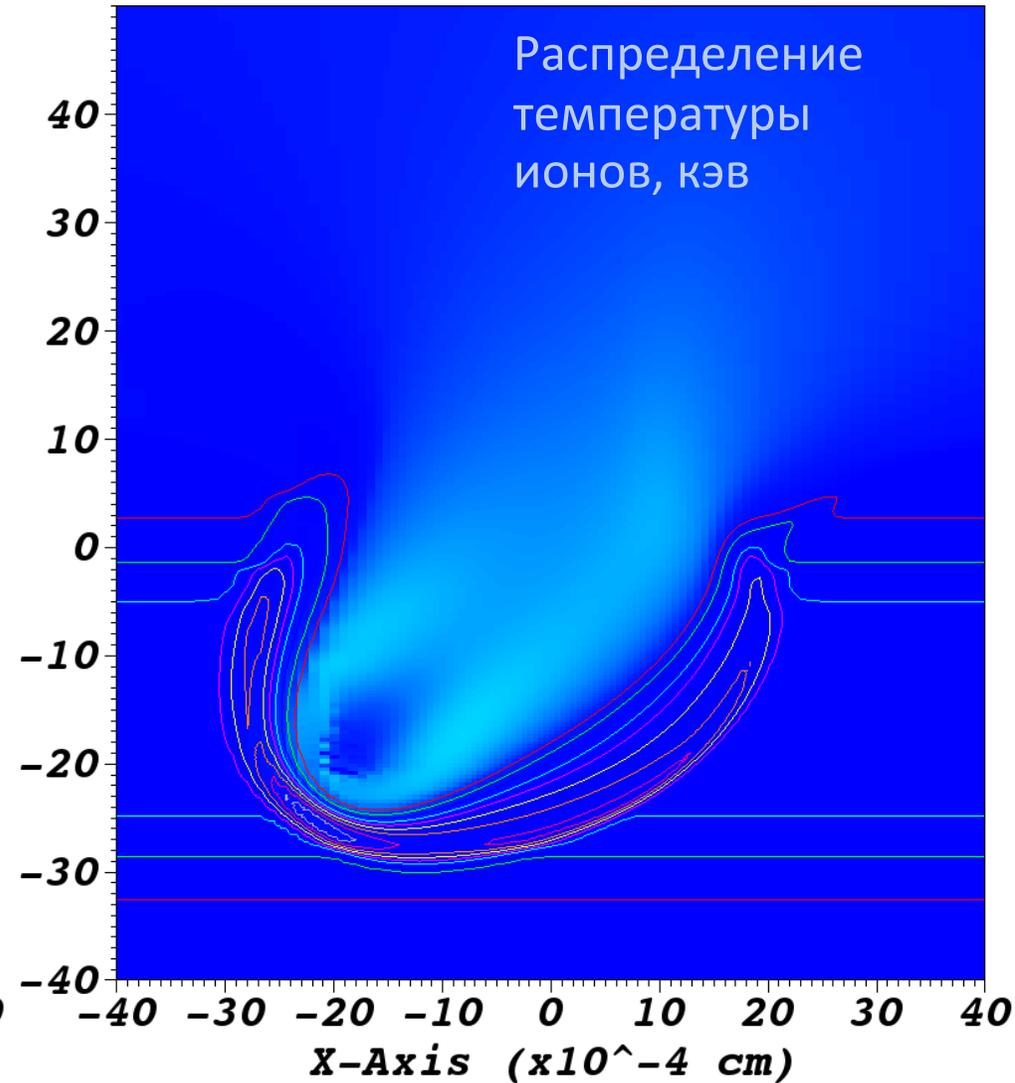
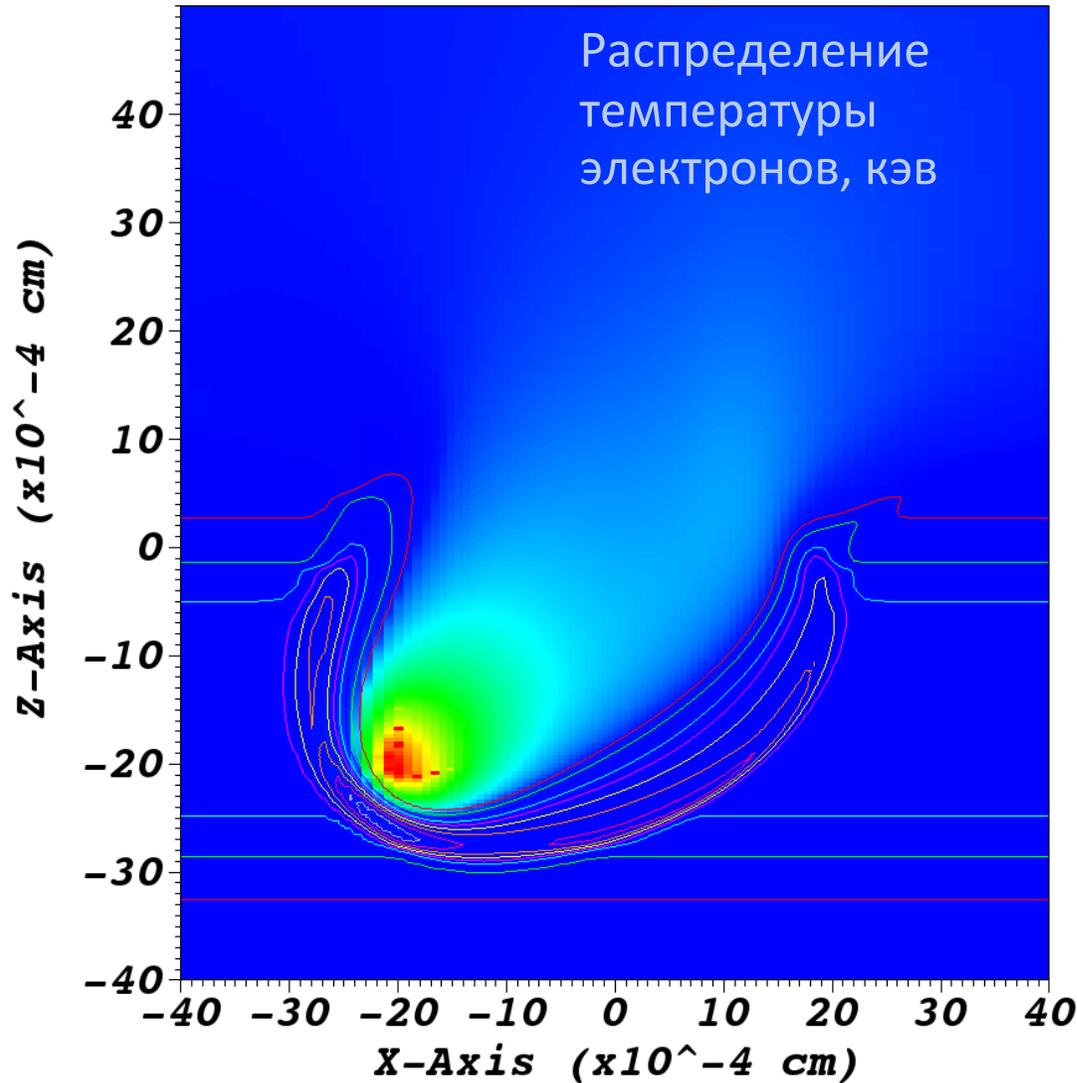
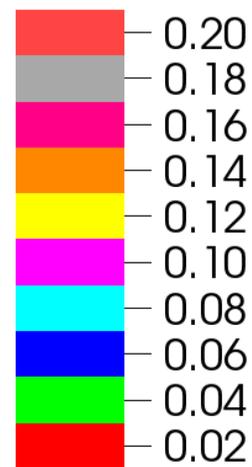


Мишень из конденсированного водорода

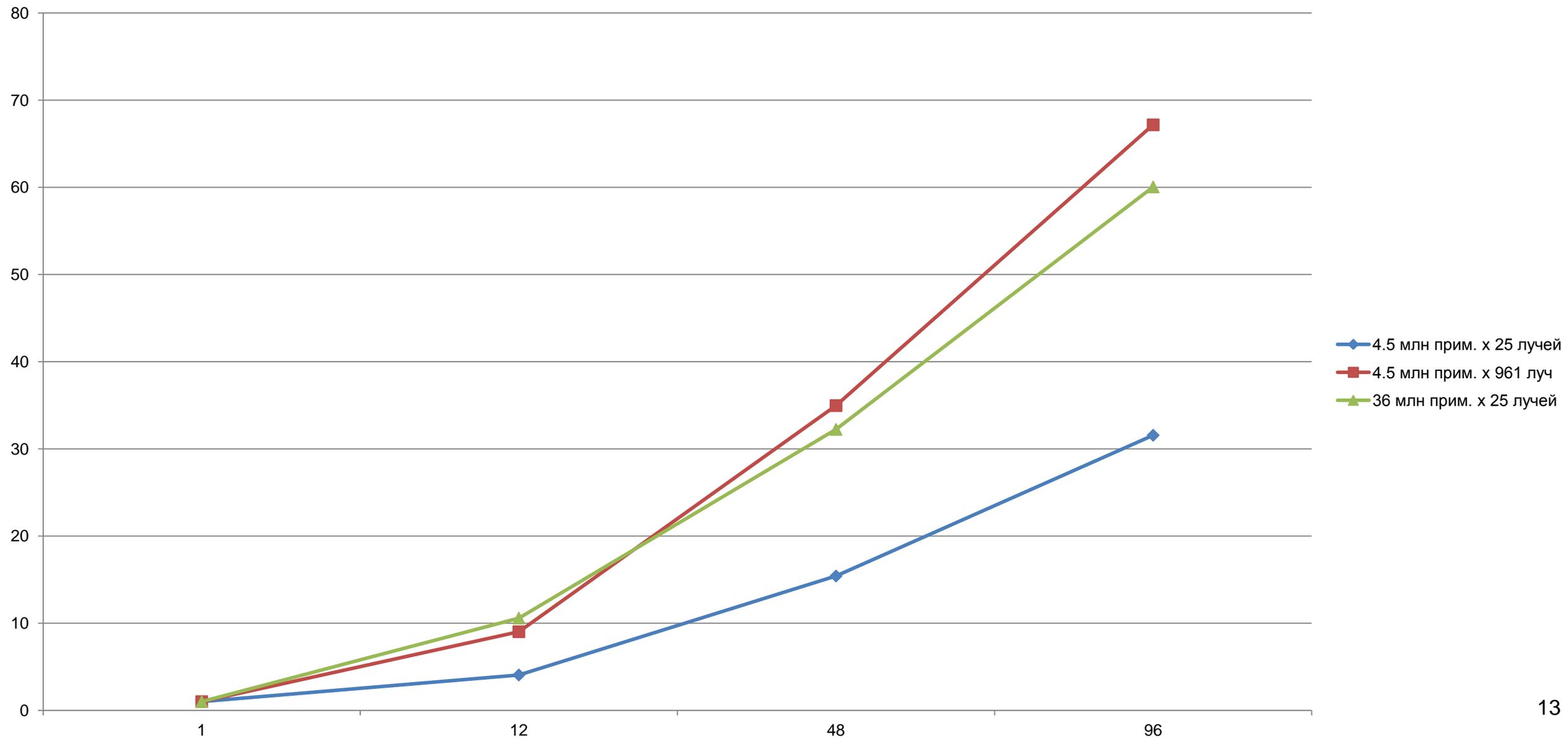
Temperature, eV



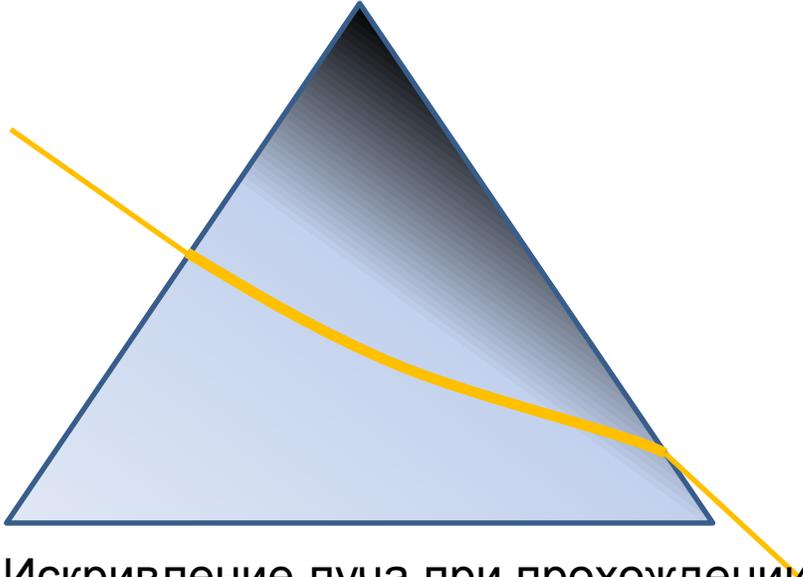
Density, g/ccm



Параллельное ускорение при решении уравнения переноса



Дальнейшее развитие: учет эффекта искривления луча вследствие рефракции



Искривление луча при прохождении в среде с линейно изменяющимся показателем преломления

Алгоритм трассировки основан на кусочно-линейной аппроксимации квадрата показателя преломления

Базовая часть алгоритма – расчет траектории в тетраэдральной ячейке

$$\begin{cases} \frac{\partial \vec{r}}{\partial \tau} = n \vec{s} \\ \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial \tau^2} = \vec{\nabla} \frac{n^2}{2} \end{cases}$$

, где \vec{r} – координата точки на траектории луча

τ – параметризация траектории луча

\vec{s} – единичный вектор направления луча

n – показатель преломления

М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. М.:Наука, 1973 –720 с.

Полученные результаты

- ✓ разработана камера-обскура, использующая трассировку прямых лучей
- ✓ разработан солвер переноса лазерного излучения и проведена аппробация на экспериментальных данных
- ✓ показана распараллеливаемость отдельных шагов солвера при решении уравнения переноса
- ✓ разработан алгоритм построения искривленного луча

Спасибо за внимание

Для анализа процессов теплообмена излучением в радиационной плазмодинамике зачастую используется стационарное уравнение переноса для спектральной интенсивности излучения $I_\nu(\vec{r}, \Omega, t)$, которое можно записать в виде:

$$\frac{1}{\kappa_\nu(\vec{r}, t)} (\Omega \nabla) I_\nu(\vec{r}, \Omega, t) + I_\nu(\vec{r}, \Omega, t) = J_\nu(\vec{r}, t)$$

где t – время, \vec{r} – радиус-вектор точки наблюдения, ν – частота фотона, Ω – направление полета фотона, κ_ν – коэффициент поглощения (обратная величина к длине свободного пробега фотона), а J_ν – излучательная способность единицы объема вещества (количество энергии испускаемой в единицу времени в один стерадиан). Во многих случаях можно считать, что J_ν определяется только термодинамическим состоянием вещества. Оптические свойства среды сильно зависят от температуры и плотности и существенно отличаются в различных частотных диапазонах излучения.

Для учета лучистого теплообмена в энергобалансе вычисляются удельная энергия излучения $U = \frac{1}{c} \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I \nu d\nu d\Omega$

и удельный поток энергии $\vec{W} = \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I \nu \Omega d\nu d\Omega$

$$Q_{Rad} = -\text{div} \vec{W}$$

Вклад излучения описывается источником в уравнении баланса энергии в виде

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon_e)}{\partial t} = -\text{div}(\kappa_e \text{grad} T_e) + Q_{ei} + Q_J + Q_{Rad}$$

Многогрупповое описание излучения используется для адекватного учета оптических свойств плазмы в различных частях спектра, а также для итерационного уточнения коэффициентов поглощения фотонов в зависимости от рассчитанного распределения интенсивности излучения. Моделируемое излучение разбивается на M частотных интервалов (групп)

$$\nu_1 = 0 < \dots < \nu_i < \dots < \nu_M < \infty$$

и уравнение (1) решается в каждой группе. В вычислениях используются средние значения интенсивности и энергии для спектральной группы i :

$$I_{[i]} = \int_{\nu_i}^{\nu_{i+1}} I_\nu d\nu$$
$$U_{[i]} = \int_{\nu_i}^{\nu_{i+1}} U_\nu d\nu$$

Принимается, что коэффициент поглощения и излучательная способность в пределах каждой группы не зависят от энергии фотонов: $\kappa_\nu(T, \rho, \nu) = \kappa_{[i]}(T, \rho)$ при $\nu_i < \nu < \nu_{i+1}$. Полная интенсивность вычисляется суммированием по спектральным группам

$$I(\mathbf{r}, \Omega, t) = \int_0^\infty I_\nu d\nu = \sum_{i=1}^M I_{[i]}$$