



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Точные решения системы уравнений переноса теплового излучения

Доклад посвящён 70летию РФЯЦ-ВНИИТФ
Шестаков А.А.

Хронология создания аналитических решений УП



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1872 Кинетическое уравнение переноса частиц (уравнение Больцмана)

1900 Теория переноса излучения квантами света (Планк)

1901-1940 Период астрофизических задач.

Решением простейшего уравнения переноса излучения в стационарной серой постановке занялись немецкие, французские и английские астрофизики. Точные решения используются для описания физических процессов в звёздах. К сожалению, имена многих ученых уже забыты, но можно назвать таких, как Шустер, Шварцшильд, Милн, Марк, Маршак, Эддингтон, Росселанд, Чандрасекар, Вик, Джинс, Фик и многие, многие другие.

1941-1970 Период создания атомной отрасли.

Точные решения УПН и УПИ пытаются использовать для описания физических процессов в атомных реакторах и ядерных устройствах. Аналитические решения УПН и УПИ в упрощённой постановке получены в работах: Дэвисон, 1960, Кейс, 1960, Зельдович Я.Б., 1966, Александров В.В., 1970 и т.д.

с ~1971 по настоящее время. Период создания тестов.

Решения УП в различных задачах получаются, в основном, численными методами на ЭВМ. Аналитические решения используются только для тестирования численных методик. В этот период начинают рассматривать частные решения в полной постановке РГД (Козманов М.Ю., Нурбаков А.Ш. О некоторых точных решениях системы уравнений РГД. ВАНТ, 1986).

Хронология создания аналитических решений в РФЯЦ-ВНИИТФ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

1. Сидоров А.Ф., Яненко Н.Н. К вопросу о нестационарных плоских течениях политропного газа с прямолинейными характеристиками. ДАН СССР, 1958, Т.123, №5, с.832-834.
2. Забабахин Е.И., Нечаев М.Н. Заполнение пузырьков в вязкой жидкости. ПММ.1960,Т.24,вып.6, С.1129-1131.
3. Романов Ю.А. Точные решения односкоростного кинетического уравнения и их использование для расчета диффузионных задач. В кн. Исследования критических параметров реакторных систем. М., Атомиздат, 1960
4. Забабахин Е.И., Симоненко В.А. Сходящаяся ударная волна в теплопроводном газе. ПММ, т. 29, №2, 1965.
5. Неуважаев В.Е. Истечение газа в вакуум при степенном энерговыделении. ДАН СССР, 1961, 141 № 5.
6. Сучков В.А. Истечение в вакуум на косой стенке. ПММ.1963,Т.27,вып.4, С.739-740.
7. Буряков О.В., Куропатенко В.Ф. Решение задачи о движении поршня в смеси двух газов. ВАНТ, 1985, в.1 с.11.
8. Шибаршов Л.И. Сжатие газа сосредоточенной оболочкой при малой асимметрии. ВАНТ, 1988, в.1, с.37.
9. Вахрамеев Ю.С. Предельные решения для некоторых газодинамических процессов с кумуляцией энергии. Физика плазмы, 1990, т.16, с.1036.
10. Думкина Г.В., Козманов М.Ю. Точное решение нелинейной системы уравнений энергии и нестационарного переноса излучения. ЖВМ и МФ, 1979, т.19, в.4, с. 1061-1063.
11. Вронский А.В. Некоторые решения уравнения переноса излучения. Отчет ВНИИТФ, инв.№ПС.01.8135/4, 2001.
12. Ногин В.Н., Жилыева Н.С. Автомодельная волна разрежения в упругопластическом материале. ЗНЧ-XVI, 2023.

Точные решения системы РГД



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

В области высоких температур и скоростей поток излучения становится определяющим, и пренебрегать взаимным влиянием между излучением, температурой вещества и газодинамическим движением нельзя. В этом случае приходится решать совместную систему РГД, в которой давление, плотность и потоки излучения играют ведущую роль.

В связи с этим, актуальной является задача нахождения точных решений для совместной системы РГД:

$$\begin{aligned}\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div}(\vec{u}) &= 0, \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{u}, \nabla), \\ \rho \frac{d\vec{u}}{dt} + \nabla(p + p_{\text{изл}}) &= 0, \quad p_{\text{изл}} = \frac{U}{3c} = \frac{\sigma T_f^4}{3}, \\ \rho \frac{dE}{dt} + (p + p_{\text{изл}}) \operatorname{div}(\vec{u}) &= Q + Q_I, \quad Q_I = \int_0^\infty \int_\Omega \alpha_{cv} (I_v - \frac{1}{4\pi} B_v) dv d\Omega, \\ \frac{\rho}{c} \frac{d}{dt} \left(\frac{I_v}{\rho} \right) + \operatorname{div}(\vec{\Omega} I_v) + \alpha_v I_v &= \frac{1}{4\pi} \alpha_{cv} B_v + \frac{1}{4\pi} \alpha_s U_v.\end{aligned}$$

Частное решение одномерной системы РГД впервые найдено в работе М.Ю. Козманов, А.Ш. Нурбаков. О некоторых точных решениях системы уравнений РГД. ВАНТ, в.3, 1986, с.68-70.

Основные требования к тестам СУПТИ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Основные **требования** при построении численных тестов СУПТИ:

1. интенсивность, плотность и поток излучения должны быть ограниченными функциями;
2. интенсивность, плотность и температура вещества должны быть неотрицательными функциями;
3. интенсивность излучения должна зависеть от всех переменных и удовлетворять уравнению $\text{div}(\vec{\Omega}J_\nu) = 0$ при выходе на стационар в вакууме ($\alpha_\nu=0$);
4. должны существовать аналитические выражения для энергии и температуры вещества, плотности и потока излучения
$$U = \int_0^\infty \int_{\vec{\Omega}} J_\nu(\vec{r}, \vec{\Omega}) d\vec{\Omega} d\nu \geq 0, \quad \vec{S} = \int_0^\infty \int_{\vec{\Omega}} J_\nu(\vec{r}, \vec{\Omega}) \vec{\Omega} d\vec{\Omega} d\nu;$$
5. в осесимметричных задачах должно выполняться условие зеркального отражения относительно оси симметрии Z и условие нулевой радиальной компоненты потока на оси $Z - (\vec{S}_\nu \vec{n}_r) = 0$.

Основные требования к тестам РГД



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

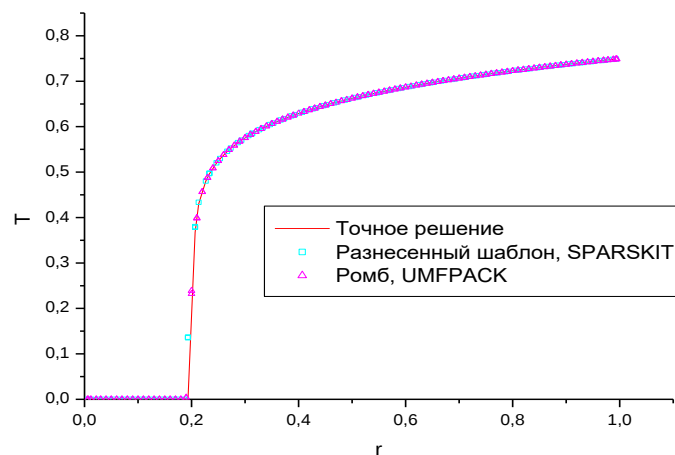
1. единая постановка граничных и начальных условий при учете газодинамики и переноса излучения для различных приближений в одномерной, двумерной и трехмерной геометриях;
2. простые аналитические формулы для пробегов, входящие в используемые библиотеки и позволяющие проводить расчеты задач РГД в однокрупной и многокрупной постановках;
3. широкий диапазон изменения коэффициентов поглощения и рассеяния;
4. простейшие уравнения состояния;

Наиболее популярные тесты для УПИ, основанные на точных решениях



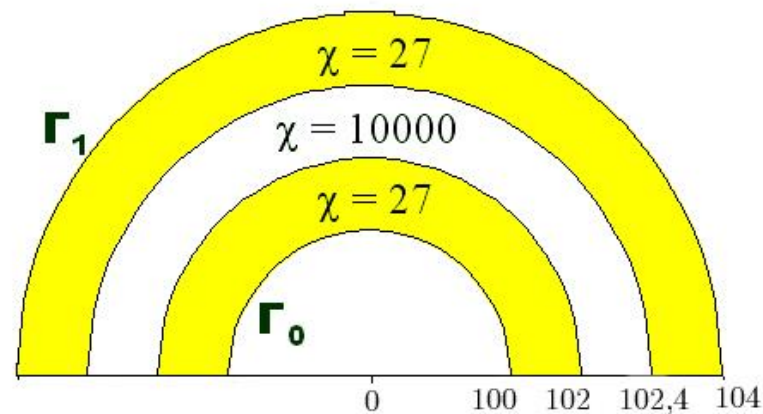
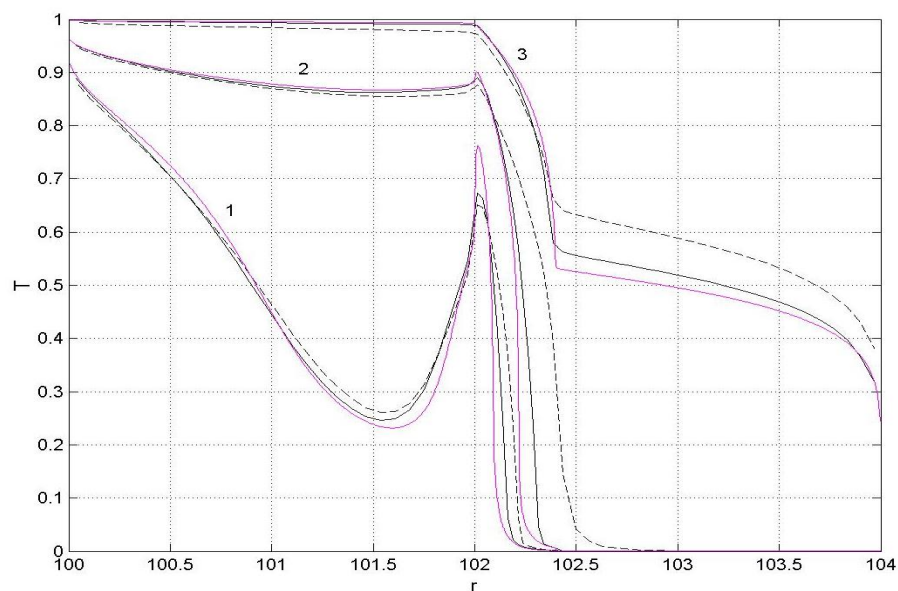
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Для приближения ЛТП – бегущая плоская волна Самарского-Соболя



$$T(r, t) = \begin{cases} (0.5(t - \frac{1-r}{4}))^{1/8}, & t > \frac{1-r}{4} \\ 0, & t \leq \frac{1-r}{4} \end{cases}$$

Для спектральной СУПТИ во всех приближениях – задачи Флека



Пример двумерной тестовой задачи СУПТИ



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

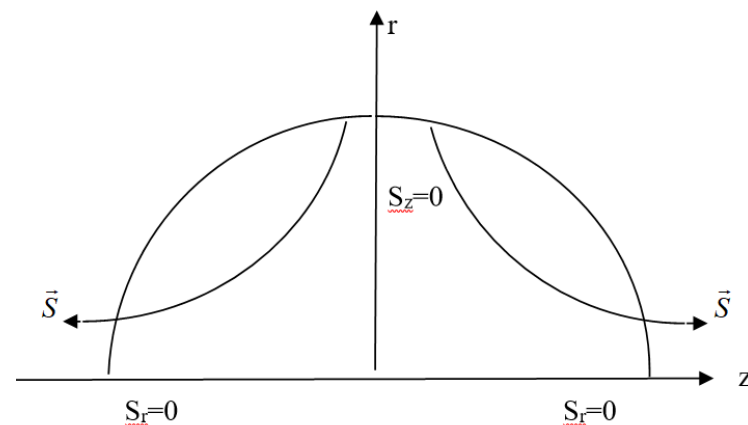
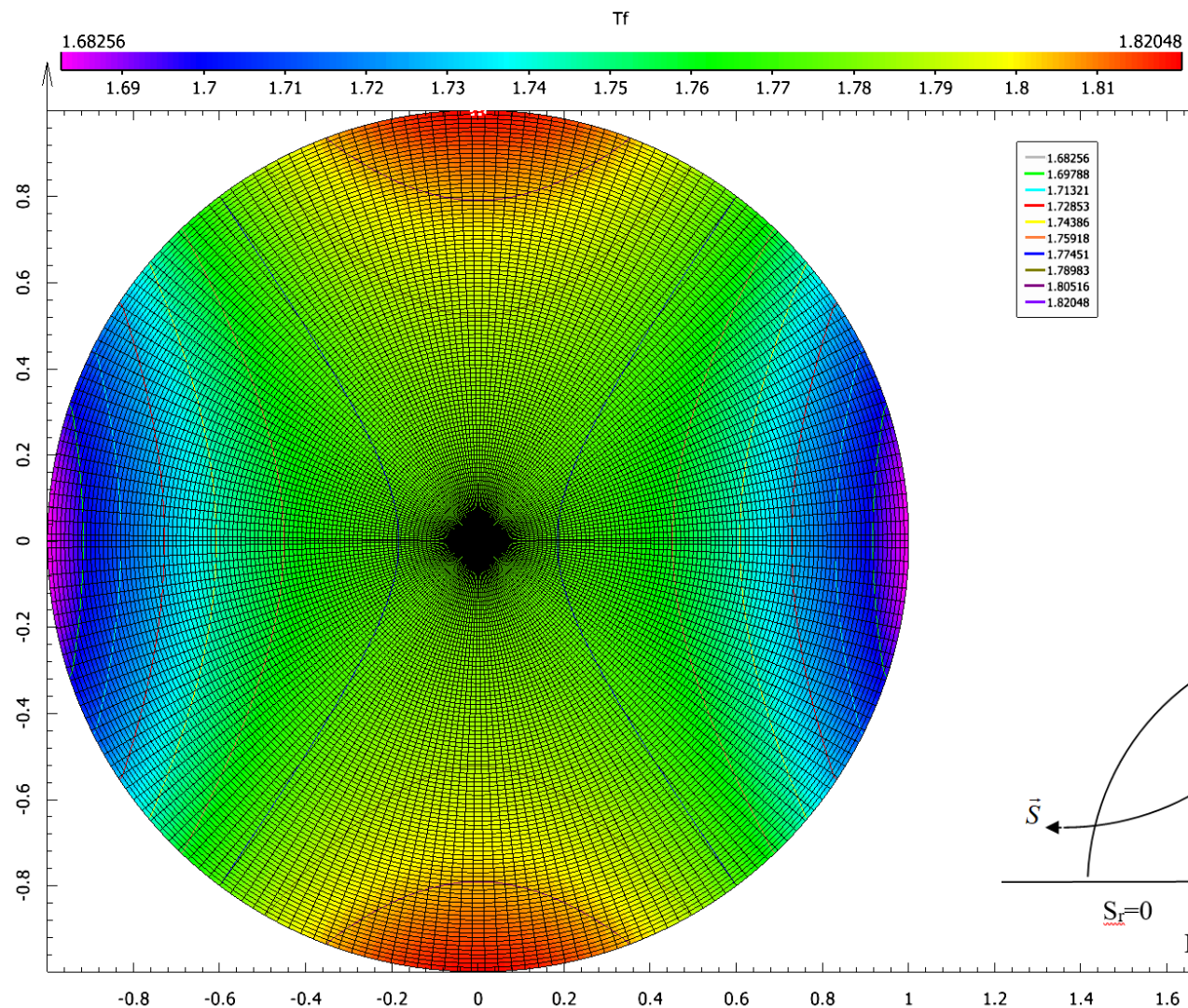


Рисунок 1 – Схема потоков

Заключение



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Нахождением точных решений уравнений переноса занимаются учёные всего мира примерно с 1900 года и по настоящее время.

Для одномерного УПН общее решение найдено Кейсом.

Для одномерной СУПТИ общее решение не найдено до сих пор.

Частные решения СУПТИ найдены впервые сотрудниками нашего института (Козмановым М.Ю. с коллегами).