

ЛИТЕРАТУРА

1. Импульсный источник γ -излучения «Гермес-II». — Сб. пер. Атомная техника за рубежом. М., 1970, № 3.
2. Poukey J. W., Freeman J. R., Yonas S. Simulations of relativistic electron beam diodes. — *J. vacuum science and techn.*, 1973, vol. 10, N 6.
3. Блейвас И. М., Голубцов Б. И., Ильин В. П., Попова Г. С., Свешников В. М. Комплекс программ для решения на БЭСМ-6 широкого класса задач статической электроники (компилирующая система КСИ-БЭСМ). — В кн.: Методы расчета электронно-оптических систем. Ч. II. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1973.
4. Ильин В. П. Численные методы решения задач электрооптики. Новосибирск, «Наука», 1974.
5. Федоренко Р. П. О скорости сходимости одного итерационного процесса. — ЖВММФ, 1964, т. 4, № 3.
6. Бахвалов Н. С. О сходимости одного релаксационного метода при естественных ограничениях на эллиптический оператор. — ЖВММФ, 1966, т. 6, № 5.
7. Ильин В. П., Свешников В. М. О разностных методах на последовательности сеток. — В кн.: Численные методы механики сплошной среды. Т. 2, № 1. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1971.
8. Захаров А. В., Самарский А. А., Свешников А. Г. Применение метода больших частиц к расчету движения заряженного пучка в электромагнитном поле с учетом пространственного заряда пучка. — В кн.: Вычислительные методы и программирование. Т. 16. М., изд. Москв. ун-та, 1971.
9. Buneman O., Kooyers G. Computer simulations of the electron mixing mechanism in ion propulsion. — *AIAA J.*, 1963, vol. 1, N 11.
10. Блейвас И. М., Зелинский Э. М., Ильин В. П. Эффективный метод ускорения сходимости процесса последовательных приближений при решении самосогласованных задач электронной оптики. — В кн.: Методы расчета электронно-оптических систем. М., «Наука», 1977.
11. Блейвас И. М., Ильин В. П., Свешников В. М. Численный расчет нестационарных пучков заряженных частиц. — ПМТФ, 1974, № 6.
12. Акимов П. И., Голубцов Б. И., Ильин В. П. Расчет электронно-оптических задач с учетом вторичной эмиссии. — В кн.: Методы расчета электронно-оптических систем. Ч. II. Новосибирск, изд. ВЦ СО АН СССР, 1973.
13. Батыгин В. В., Топтыгин И. И. Сборник задач по электродинамике. М., «Наука», 1970.
14. Belomytsev S. Ya., Sveshnikov V. M., Popova G. S. Beam parameter calculation in coaxial vacuum diode. — In: Proceedings of the VIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. Novosibirsk, 1976.
15. Ron A., Mondelli A. A., Rostoker N. — *IEEE Trans. Plasma Science*, 1973, PS-1.
16. Авроров А. П., Астрелин В. Т., Бояринцев Э. Л., Капитонов В. А., Логунов В. М. Импульсный ускоритель электронов «Акваген». — В кн.: Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т. II. Ленинград, изд. НИИЭФА, 1977.
17. Брейзман Б. И., Рюттов Д. Д. К теории фокусировки релятивистского электронного пучка в диоде. — *Докл. АН СССР*, 1975, т. 225,

УДК 536.5.55

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВЕРХВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР

В. Н. Богомолов, И. И. Захаркин

(Москва)

Задача определения высоких и сверхвысоких температур является актуальной в связи с освоением техникой новых источников энергии большой мощности. Известные методы измерения температур с использованием термопар, ультразвука, а также оптические методы имеют ограничения по диапазону измеряемых величин, либо их использование связано с большими трудностями практической реализации.

В данной работе описывается метод определения температуры, основанный на явлении ретермализации нейтронов. В качестве агента, взаимодействующего с горячей средой, используется нейтрон. При рассеянии нейтронов на атомах горячей среды происходит изменение их энергетического спектра, которое однозначно связано с кинетической температурой среды. Метод в принципе не имеет видимого верхнего предела измеряемых температур.

Рассмотрим кратко физические основы метода. Известно, что в достаточно большом объеме замедлителя с источником нейтронов формируется энергетическое распределение плотности потока нейтронов, близкое к состоянию термодинамического равновесия со средой. При изменении температуры среды происходит соответствующее изменение и в энергетическом спектре нейтронов. Зависимость между температурой среды и температурой максвелловского распределения нейтронов достаточно хорошо выявлена. В работе [1] описан положительный опыт использования линейной связи между температурами нейтронного газа и замедляющей кладки активной зоны пульсирующего реактора для определения температуры кладки в процессе развития импульса мощности реактора.

Описываемая ниже модификация метода позволяет измерять температуру газового потока за пределами активной зоны энергетической установки и состоит в следующем. При наличии двух граничащих сред, имеющих разные температуры, вдали от границы сред устанавливаются равновесные спектры нейтронов с соответствующими температурами нейтронного газа. Вблизи же границы раздела реализуются спектры нейтронов, отражающие переходный процесс релаксации температуры нейтронного газа. Наблюдая поведение энергетического потока нейтронов в одной из сред вдали и вблизи от границы, можно сделать однозначный вывод о температуре другой среды. Следует заметить, что требование равновесности процессов обмена энергией между нейтронами и атомами среды не является обязательным, так как даже при неполном обмене энергией между нейтронами и атомами среды можно получить достаточно информации о температуре последней. Естественно, что эффект ужесточения спектра нейтронов будет значительнее с увеличением плотности и объема среды, температура которой измеряется.

Для реализации метода рядом с потоком газа (через соответствующую теплоизоляцию) необходимо расположить блок замедлителя при относительно низкой температуре. Блок замедлителя может содержать источник нейтронов либо облучаться нейтронами утечки из активной зоны. В блоке замедлителя происходит термализация нейтронов, которые, попадая из блока в газовый поток, рассеиваются атомами газа с приобретением энергии.

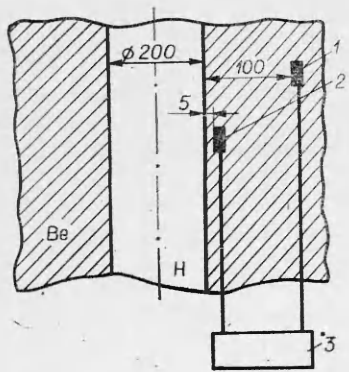
В блоке вблизи границы раздела с газовой средой будет наблюдаться компонента нейтронного потока с более жестким энергетическим спектром нейтронов, чем в блоке. Ужесточение нейтронного спектра можно определить с помощью детектора тепловых нейтронов, экранированного, например, чехлом из гадолиния. Таким образом, замедляющий блок является источником тепловых нейтронов, направляемых в газовую среду, и выполняет роль теплового экрана для детектора нейтронов, измеряющего ужесточение нейтронного спектра.

В предлагаемой схеме реализации метода определения температуры с помощью тепловых нейтронов для их детектирования используется скалярный (интегрированный по углам) поток нейтронов. Кроме этого, детектор располагается непосредственно в замедляющей среде, поэтому требование к интенсивности источника нейтронов будет на 2—3 порядка ниже,

чем в схеме, использующей принцип коллимированного пучка нейтронов, рассмотренный в работе [2]. Оценки показывают, что с использованием стандартного детектора нейтронов с эффективностью регистрации $\sim 0,1$ для нейтронов тепловых энергий для описываемых целей достаточно источника интенсивностью $\sim 10^7$ нейтрон/с, помещенного в блок замедлителя, например бериллия, разумных размеров ($40 \times 40 \times 40$) см³. Средняя плотность потока нейтронов в призме составит $\sim 10^5$ нейтрон/см²·с, что достаточно для работы детектора как в токовом, так и в импульсном режиме. Режим работы определяется выбором схемы, геометрией взаимного расположения источника и детекторов нейтронов и требованиями к динамическим характеристикам измерительной системы.

Для выявления чувствительности данного метода измерения температуры газа проведены расчеты для следующей модели, схема которой представлена на фигуре (1, 2 — детекторы нейтронов, чувствительные к форме тепловой части спектра, 3 — измерительный блок). Предполагалось, что бесконечный блок бериллия содержит бесконечно длинную цилиндрическую полость диаметром 200 мм, заполненную водородом плотностью 10^{21} ядер/см³. Температура бериллия принималась постоянной и равной 300 К, а температура водорода менялась и составляла 300; 1300; 2000 и 5000 К. Для этих четырех вариантов проведены расчеты энергетических спектров нейтронов в бериллии на различных расстояниях от границы с полостью. Спектр нейтронов рассчитывался в интервале энергий 0 — 0,67 эВ по 15-групповой программе в P_1 -приближении метода сферических гармоник [3]. Рассеяние нейтронов на бериллии рассматривалось по кристаллической модели, а на водороде — в рамках газовой модели. Распределение источников нейтронов в тепловую область энергий принималось пространственно-независимым.

Результаты расчета показали, что энергетический спектр нейтронов в бериллии вблизи границы с полостью при повышенных температурах водорода заметно ужестчен, однако на расстояниях ≥ 100 мм от границы спектр соответствует равновесному в бериллии. С использованием полученных спектров были вычислены отношения скоростей реакций двух нейтронных детекторов с сечением реакции $\sim 1/v$, помещенных в бериллий на расстояниях 5 и 100 мм от границы с полостью. Оба детектора содержали гадолиниевые фильтры толщиной 0,15 мм. Полученные отношения скоростей реакций составили 1,00; 2,10; 3,35; 5,50 для температур водорода 300; 1300; 2000 и 5000 К соответственно. В интервале температур 2000 — 5000 К чувствительность метода в данном примере составляет $\sim 7\%$ изменения показаний детектора на каждые 100 К изменения температуры



водорода, что демонстрирует довольно высокую чувствительность. Общеизвестная точность подобных расчетов в рамках принятой модели не хуже 15% [4], по нашим оценкам она составляет $\sim 10\%$. Следует заметить, что в качестве материала блока могут быть взяты также графит, окись бериллия, гидриды металлов. Полученная в рассмотренном примере чувствительность не является максимальной, она может быть повышена более оптимальным выбором детектора и фильтра, что является предметом специального рассмотрения.

Для практической реализации метода необходимо иметь расчетные спектры нейтронов для выбранных размеров геометрии блока

при различных температурах газа и его плотности. Зная плотность газа из независимых измерений, по показаниям двух детекторов с использованием расчетных спектров для данной плотности можно определить искомую температуру. Наличие в блоке двух детекторов позволяет исключить влияние колебаний нейтронной мощности, если в качестве источника нейтронов используются нейтроны утечки из активной зоны. Реальные средние линейные размеры замедляющего блока составляют 100—500 мм в зависимости от вида замедлителя. Для использования рассматриваемого метода на практике необходимо провести дополнительные исследования по обоснованию основных параметров такого типа термометра, а также преодолеть ряд технических трудностей.

Однако основное преимущество метода — отсутствие видимого предела измеряемых температур — делает его привлекательным для практического использования при освоении области сверхвысоких температур.

Авторы выражают благодарность Г. А. Илясовой и М. Я. Банкрашковой за их любезное содействие в проведении расчетов энергетических спектров нейтронов.

Поступила 27 IV 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Fleck C. M. und Meisterl J. Das Verhalten der Neutronentemperatur während eines Leistungsimpulses. — «Atomkernenergie», 1968, Jg 13, N 6.
2. Луганский Л. Б., Пятаевский Л. П., Фикс В. Б. Диагностика плотной плазмы с помощью медленных нейтронов. — «Письма в ЖТФ», 1976, т. 2, вып. 2.
3. Марчук Г. И., Турчин В. Ф., Смелов В. В., Илясова Г. А. Методы расчета спектра медленных нейтронов. — «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 6.
4. Бейстер Дж., Нейл Дж. М. Спектры тепловых нейтронов. — В кн.: Спектры медленных нейтронов. М., Атомиздат, 1971.

УДК 621.384

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ ВЗВЕШЕННЫХ В ДВУХФАЗНЫХ СРЕДАХ ЧАСТИЦ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ

А. Г. Боровой

(Томск)

Определение концентрации, размеров и внутренней структуры взвешенных в двухфазных средах макроскопических частиц бесконтактными методами является важной технической задачей. Если размеры частиц порядка длины волны света, то для этой цели широко используются методы, основанные на рассеянии света частицами. Наиболее прямой метод заключается в наблюдении оптического сигнала, рассеянного отдельной частицей [1]. Имеется также ряд методов, где регистрируется суммарный сигнал от большого числа частиц, но при этом должно быть пренебрежимо малым многократное перерассеяние света на частицах [2, 3]. Вместе с тем сложная зависимость амплитуды рассеяния от показателя преломления, формы частиц и т. д., а также нарастание фона многократно рассеянного света при увеличении толщины рассеивающего слоя ограничивают область применения таких методов и делают желательным, например, для калибровки приборов, использование других методов измерения.