

Изменение характеристик диверторного монитора нейтронного потока ИТЭР при потере теплоносителяР.И. Керимов^{1,2}, С.Ю. Обудовский¹¹Московский физико-технический институт (государственный университет)²ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований

ИТЭР (ITER, International Thermonuclear Experimental Reactor) – проект международного экспериментального термоядерного реактора. Принцип его работы и параметры, а также описание основных методов диагностики плазмы описаны в статье «Progress in the ITER physics basis» журнала Nuclear Fusion [1].

Одним из видов диагностики, который будет применяться в рамках проекта ИТЭР, является нейтронная диагностика [1]. Для измерения полного потока нейтронов будет использован диверторный монитор нейтронного потока (далее – ДМНП), регистрацию нейтронов в котором будут производить в том числе ионизационные камеры деления (далее – ИКД), основные принципы работы которых изложены в данной работе, более подробно – в [2]. При работе ИТЭР ДМНП продолжительное время будет подвергаться высоким температурам, поэтому он будет оснащен собственной системой охлаждения, в которой тепло предполагается отводить с помощью теплоносителя – дистиллированной воды. При этом вода является эффективным замедлителем (и в некоторой степени поглотителем) для нейтронов, оказывая существенное влияние на энергии и количество этих частиц в потоке [3], [4]. При аварии на ИТЭР возможна частичная или полная потеря теплоносителя. Целью данной работы является экспериментальное определение изменения характеристик ИКД при изменении количества и температуры воды в системе охлаждения.

С этой целью были проведены исследования изменения скорости счёта нейтронов ИКД ДМНП при изменении свойств теплоносителя в следующих условиях:

- ИКД без макета системы охлаждения;
- ИКД в слое кадмия, чтобы поглотить тепловые и надтепловые нейтроны (энергия отсечки 0,4 эВ) натекающие извне;
- ИКД в слое карбида бора, чтобы поглотить тепловые и надтепловые нейтроны натекающие извне;
- ИКД в макете системы охлаждения с изменяемым уровнем теплоносителя;
- эксперимент аналогичный предыдущему, но макет системы охлаждения окружён кадмием, чтобы отсеять тепловые нейтроны.

Дополнительно была проведена серия экспериментов по исследованию влияния изменения температуры теплоносителя на скорость счёта ИКД. В рамках этих опытов, ИКД была помещена в макет системы охлаждения, заполненной теплоносителем определённой температуры. Эксперименты были проведены для диапазона температур от 0°C до $(99 \pm 1)^\circ\text{C}$.

Все эксперименты были выполнены на двух разных ИКД, с радиаторами на основе урана-235 и урана-238, которые отличаются чувствительностью к нейтронам разных энергий, в первую очередь – к тепловым. Сечения деления изотопов урана представлены на рис. 1 [4]. Такой подход позволит проанализировать скорость счёта как тепловых, так и более быстрых нейтронов [5]. В качестве источника нейтронов использован нейтронный генератор НГ-24М, который может создавать поток нейтронов с энергией 14 МэВ плотностью до $1,5 \times 10^{11}$ нейтр./с.

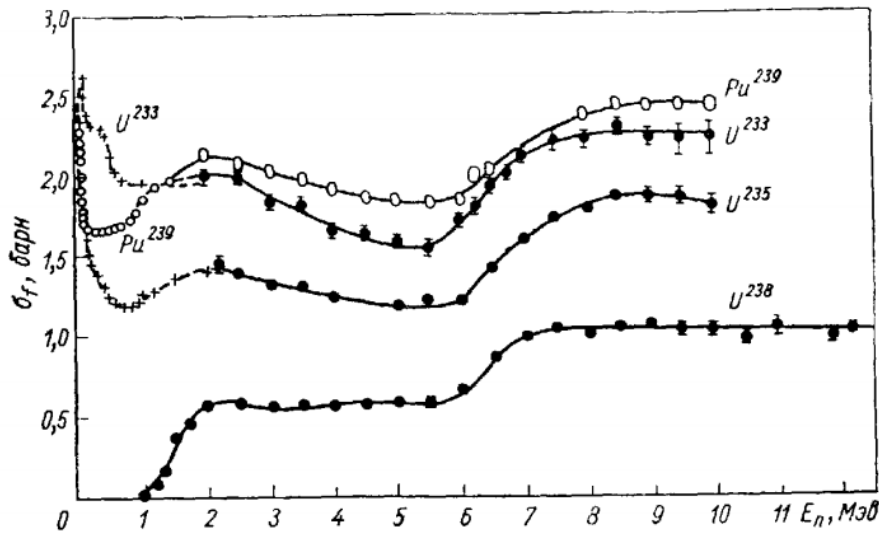


Рис. 1. Сечения поглощения U-235, U-238 и некоторых других элементов

Размещение оборудования и схема измерения представлена на рисунке 2.

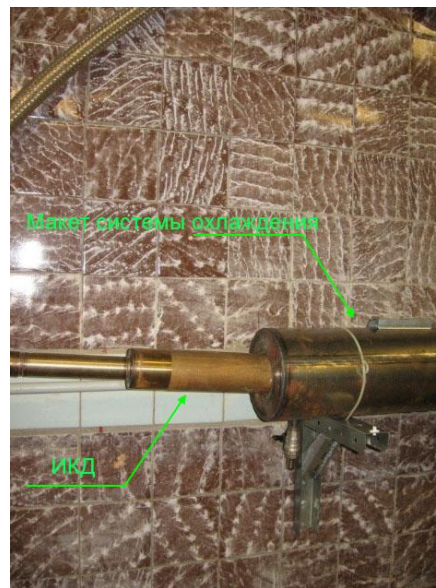
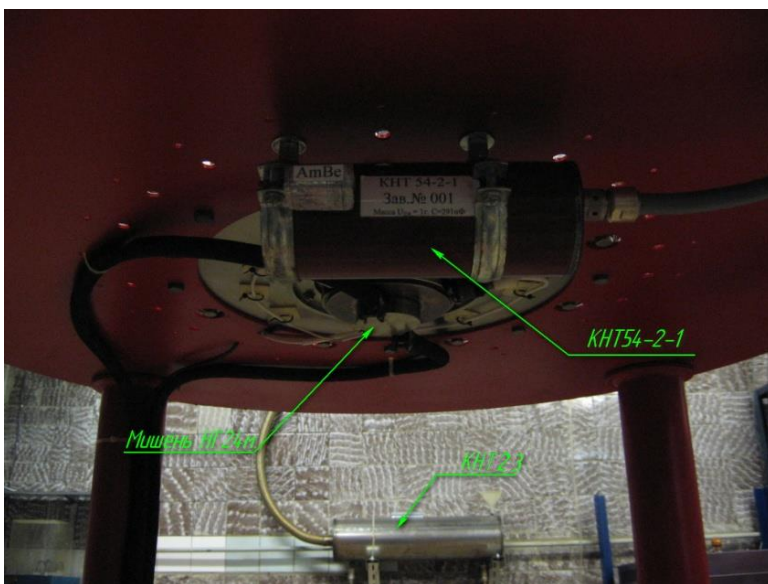
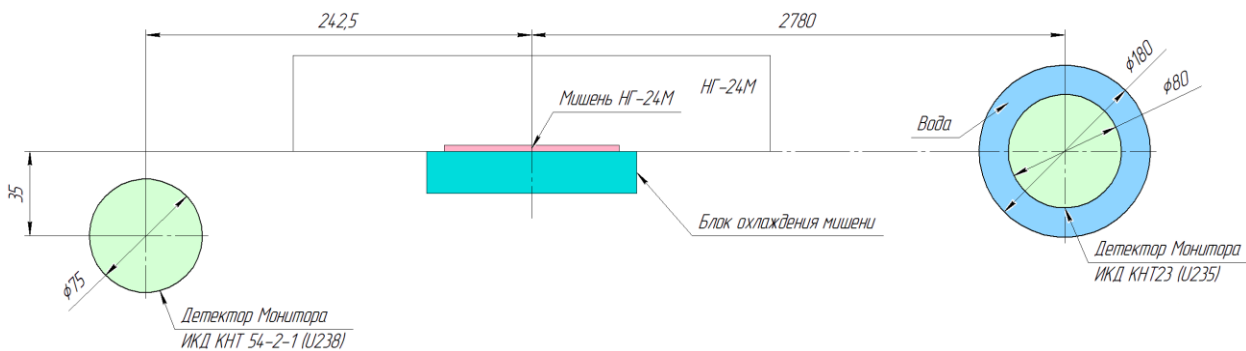


Рис. 2. Размещение оборудования

Во время эксперимента система охлаждения была заполнена теплоносителем – водой, которая в значительной степени влияет на поток нейтронов, идущий через неё. Длина замедления (расстояние, необходимое для замедления нейтронов до уровня тепловых) воды при нормальных условиях около 13 см. Это значит, что система охлаждения содержит в себе достаточное количество воды для того, чтобы доля термализованных

нейтронов была высока [4]. Именно по этой причине потеря теплоносителя или изменение его свойств (плотность, уровень заполнения) будет влиять на распределение нейтронов в потоке по энергиям, и, как следствие, будет изменяться скорость счёта ДМНП. Важно понимать, что вода замедляет не любые нейтроны, т.к. сечение нейтрон – протон резко падает при повышении энергии выше 100 кэВ.

Результаты экспериментов

В экспериментальные результаты, приведенные в данном разделе, представлены в доверительном интервале 66%.

Эксперимент №1: измерение скорости счета импульсов ИКД КНТ23 с радиатором на основе U-235, установленной внутри макета системы охлаждения ДМНП при разных уровнях теплоносителя.

$f(t) = f_k + 11,18 \cdot V^2 + 2,74 \cdot V$, где f_k – скорость счёта при полностью пустом макете системы охлаждения, V – объём теплоносителя в литрах.

Эксперимент №2: Схема полностью аналогична предыдущему эксперименту, но макет окружен слоем кадмия толщиной 1 мм, чтобы отсеять тепловые нейтроны, идущие извне.

$f(t) = f_k + 8,28 \cdot V^2 + 129,53 \cdot V$, где f_k – скорость счёта при полностью пустом макете системы охлаждения, V – объём теплоносителя в литрах.

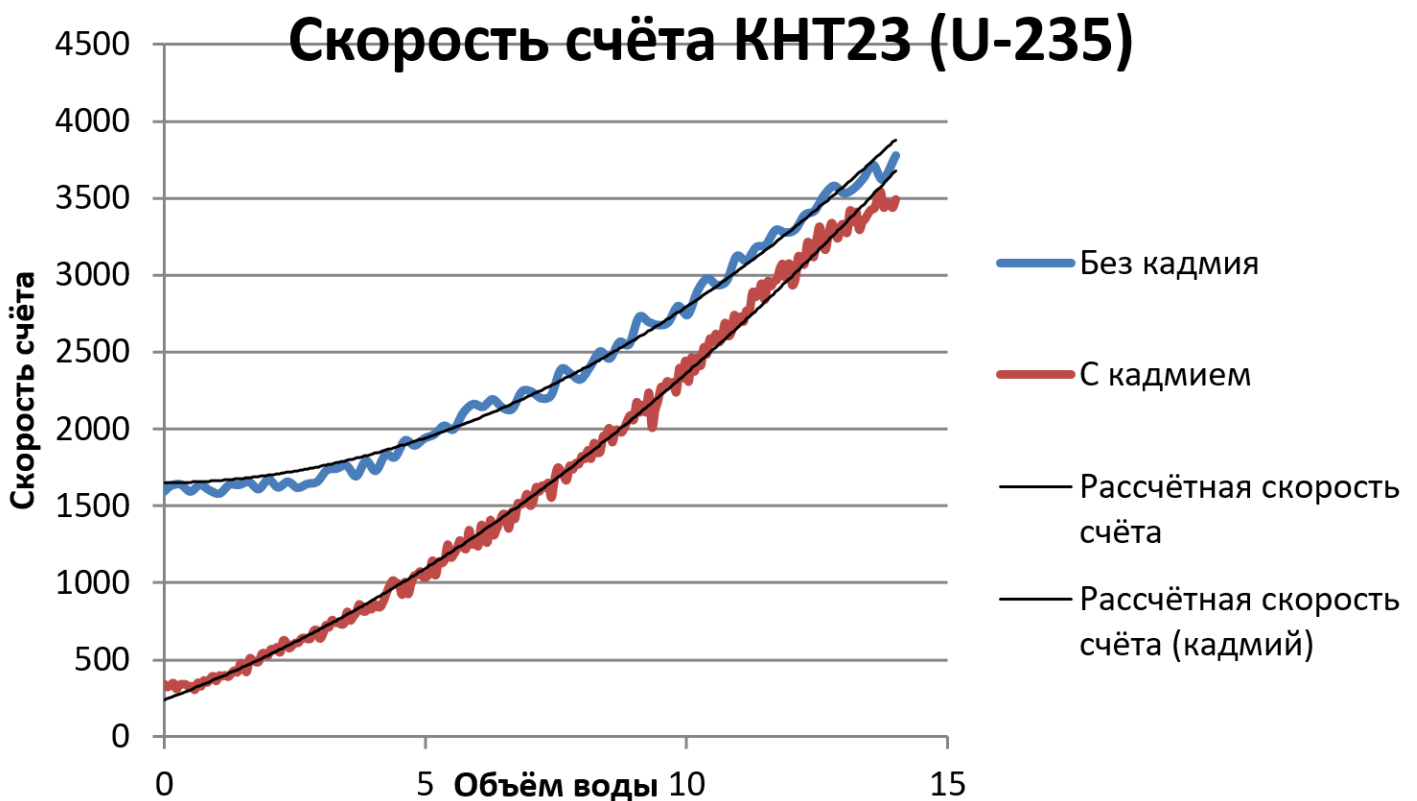


Рис. 3. Эксперименты №1-2, зависимость $f(V)$

Вода поглощает тепловые нейтроны извне, и термализует более быстрые, создавая множество тепловых.

Эксперименты №3-10: измерение скорости счета импульсов ИКД с радиаторами на основе U-235 и U-238, установленными внутри и вне макета системы охлаждения ДМНП, с и без окружения из материалов, поглощающих тепловые нейтроны, идущие извне. Все эти эксперименты в совокупности показали, что большая часть тепловых

нейтронов, регистрируемых ИКД – это нейтроны, термализованные теплоносителем. Также удалось проверить на практике, что U-238 незначительно реагирует на тепловые нейтроны в силу малого сечения деления для них.

В следующей серии экспериментов была исследована зависимость скорости счёта ИКД от температуры теплоносителя. Контроль значения температуры теплоносителя (воды) осуществлялась при помощи климатической установки.

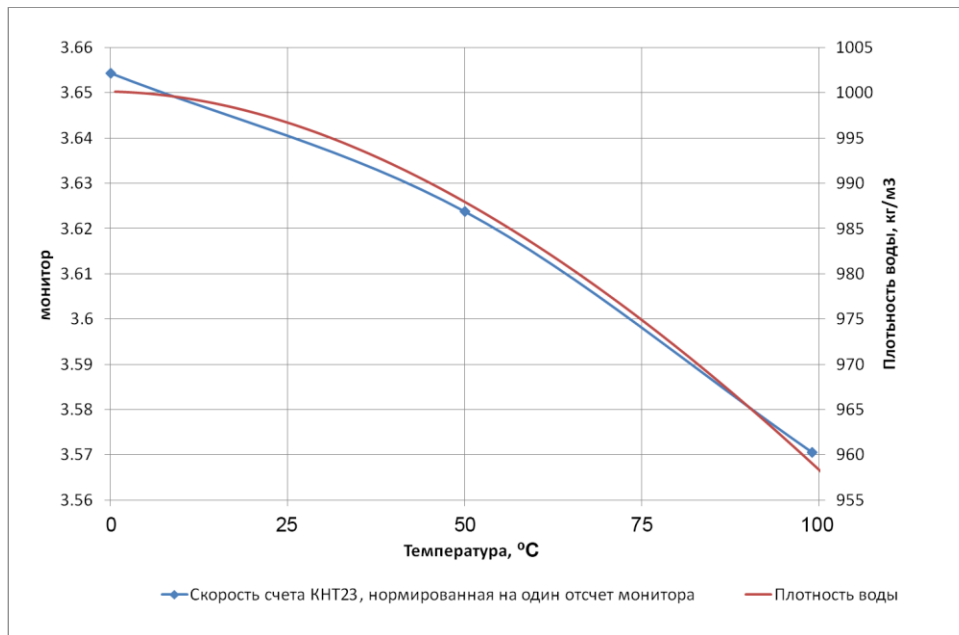


Рис. 5. Зависимости плотности теплоносителя и скорости счёта ИКД с U-235 от температуры

Несмотря на малое количество измерений в опытах с ИКД КНТ23, можно утверждать, что влияние температуры теплоносителя – относительная малая величина, так как на всём возможном температурном диапазоне (при атмосферном давлении) среднее значение скорости счёта изменилась всего на 2,3%, что сопоставимо с погрешностью измерений – 2,2%. Однако была обнаружена корреляция с температурным изменением плотности теплоносителя, и этому может быть дано физическое объяснение – макроскопическое сечение вещества есть произведение микроскопического сечения на ядерную плотность этого вещества. При повышении температуры воды происходит тепловое расширение, которое уменьшает её ядерную плотность. Это приводит к уменьшению макроскопического сечения, а как следствие – к ухудшению свойств воды как замедлителя нейтронов. Таким образом, количество тепловых нейтронов, к которым ИКД с радиатором на основе U-235 наиболее чувствительны, падает, что приводит к уменьшению скорости счёта.

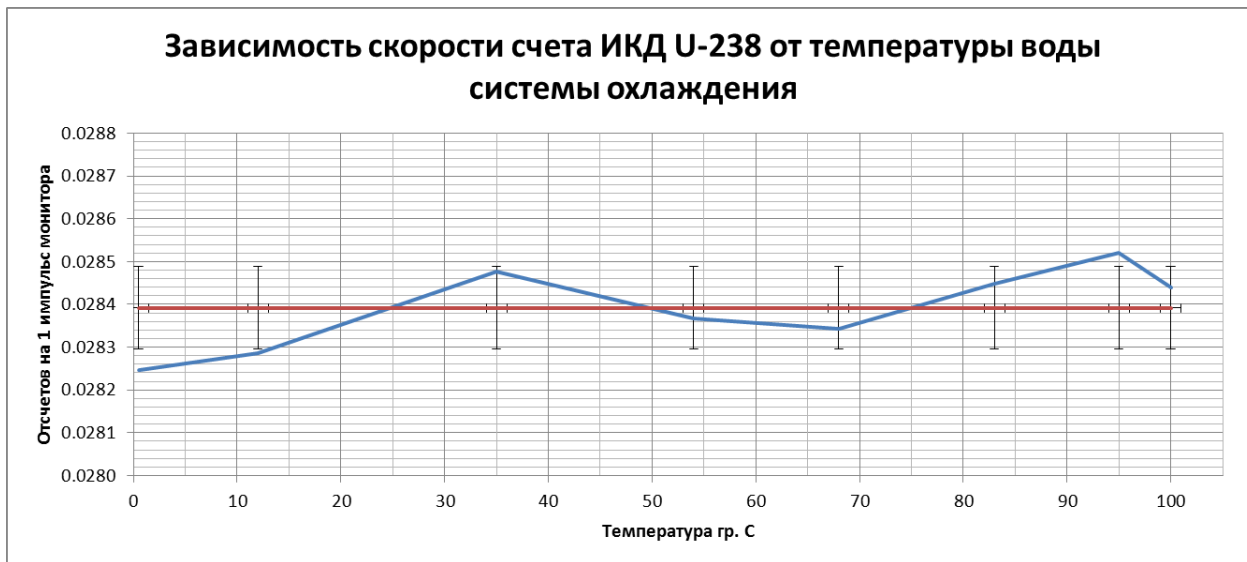


Рис. 6. Зависимость скорости счёта от температуры.

Проведенный эксперимент показал изменение скорости счета КНТ54-2-1 на 0,679%, что сопоставимо с погрешностью измерений – 0,7%.

Выводы

1. Эксперимент показал, что тепловые нейтроны, идущие от конструкций внутри вакуумной камеры ИТЭР, будут давать относительно небольшой вклад, пока в системе охлаждения есть достаточное количество теплоносителя. Эксперименты №1-2 показали, что наличие воды в системе охлаждения даёт вклад в скорость счёта много больший, чем внешние тепловые нейтроны.
2. В рамках опыта был обнаружен квадратичный характер зависимости скорости счёта ИКД с радиатором на основе U-235 от объёма теплоносителя в рассмотренной геометрии системы охлаждения (концентрические цилиндры).
3. Было экспериментально проверено, что ИКД на основе U-238 достаточно слабо реагируют на изменение количества теплоносителя в системе охлаждения, а также было дано этому теоретическое объяснение – сечение деления U-238 для тепловых нейтронов очень мало.
4. Было показано, что ИКД на U-235 и U-238 незначительно меняют свою скорость счёта при изменении температуры от 0,5°C до 99°C. При этом обнаружена прямая зависимость скорости счёта ИКД на U-235 от плотности теплоносителя.

Литература

1. Nuclear Fusion, volume 47, number 6, 2007.
2. Б. Росси, Г. Штауб, «Ионизационные камеры и счётчики», М.: Издательство иностранной литературы, 1951, с. 131
3. D. Hughes, R. Schwartz, «Neutron cross sections», BNL-325, 1958
4. По материалам сайта nuclphys.sinp.msu.ru
5. Э. Хайд, И. Перлман, Г. Сиборг, «Ядерные свойства тяжёлых элементов», пер. с англ., в. 5, М., 1969 с. 64