

числены значения менсмолекулярных параметров UF_6 :
 $\epsilon/R = 224^\circ \text{K}$, $\sigma = 8,3 \text{ \AA}$.

В заключение автор считает своим долгом выразить признательность акад. И. К. Кикоину за ряд полезных советов и замечаний.

Поступило в Редакцию 2/II 1972 г.
 В окончательной редакции 15/VIII 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Малышев. «Теплофизика высоких температур», № 6 (1972).
2. В. Weiustock, R. Crist. J. Chem. Phys., 16, No. 5 (1948).
3. J. Masi. J. Chem. Phys., 17, No. 9 (1949).
4. В. В. Малышев. «Атомная энергия», 32, вып. 4, 313 (1972).

Некоторые результаты дозиметрического контроля на ядерном реакторе ИТР-2000 в Софии

И. Т. МИШЕВ, М. Г. ГЕЛЛЕВ
 (Физический институт Болгарской АН)

УДК 539.12.08:621.039.538.7

Основная биологическая защита активной зоны ядерного реактора ИТР-2000 в Софии, как и на других реакторах этого типа, состоит из воды и тяжелого бетона. Кроме того, около экспериментальных каналов имеется дополнительная биологическая защита из воды, парафина, борной кислоты и тяжелого бетона. Поскольку в различных экспериментах толщина и состав этой защиты меняются, мощность дозы за ней также изменяется. Как правило, оно не превышает предельно допустимых значений. Дозиметрический контроль в главном зале реактора осуществляется стационарными и переносными приборами, измеряющими мощность дозы γ -излучения, быстрых $E > 0,5 \text{ Мэв}$ и тепловых $E < 0,4 \text{ эв}$ нейтронов, активность газа и аэрозолей. Очевидно, что измеренная доза будет отличаться от реальной за счет дозы нейтронов с энергией $0,4 \text{ эв} - 0,5 \text{ Мэв}$. Еще более существенна разница между реальной и измеренной индивидуальными дозами вследствие того, что индивидуальный контроль на ИТР-2000 долгое время осуществляли только по γ -излучению и тепловым нейтронам.

В 1966—1967 гг. группа радиобиологов провела медико-биологическое обследование персонала, работающего на реакторе ИТР-2000 в Софии. Было обследовано несколько групп людей, продолжительное время работающих в главном зале, в радиохимической лаборатории и в главном зале реактора непосредственно у экспериментальных каналов. У некоторых были обнаружены хромосомные aberrации.

Из сопоставления данных обследования с данными регулярного индивидуального дозиметрического контроля радиобиологи сделали вывод, что хромосомные aberrации появляются у человека не только после облучения дозой несколько десятков бэр, но даже при облучении дозой примерно 1 бэр/год [1].

Поскольку этот вывод мог привести к сомнению в достоверности зарегистрированной величины дозы облучения у обследуемых людей, было решено определить наибольшие возможные индивидуальные дозы облучения людей, работающих на реакторе.

Доза нейтронов, за исключением группы с энергией $7-500 \text{ кэв}$, измерялась пленкой MKT-20 с коррелирующим пакетом [2, 3]. За защитой реактора (здесь эмульсия облучалась без фантома) измеряли в основном дозы тепловых ($E < 0,4 \text{ эв}$) и быстрых ($0,5 < E < 15 \text{ Мэв}$) нейтронов. Дозу γ -излучения определяли с помощью рентгеновских пленок Adox и ORWO. Концентрацию радиоактивных газов определяли прибором высокой

чувствительности [4], а концентрацию аэрозолей — методом прокачки воздуха через фильтр.

Для определения наибольшей возможной индивидуальной дозы облучения измеряли дозу нейтронов и γ -излучения, а также концентрацию аэрозолей и радиоактивного газа в доступных для людей местах, причем там, где эти величины достигают наибольшего значения. Эти места были выбраны непосредственно за дополнительной биологической защитой около экспериментальных каналов, которые чаще всего были открыты во время работы реактора. На основе этих измерений с учетом рекомендаций Международной комиссии радиологической защиты была определена суммарная доза облучения в бэрах. При этом предполагали следующие: 1) реактор работал только на максимальной мощности 1500 кВт ; 2) рассматриваемые нами горизонтальные каналы во время работы реактора были непрерывно открыты; 3) люди находились в этих местах в течение всего рабочего времени (46 недель в году). Полученная ими доза была максимально возможной годовой дозой облучения. Результаты определения доз приведены в табл. 1.

Кроме того, были обследованы такие места за защитой реактора, где мог бы задержаться кто-либо из сотрудников, нарушив все правила безопасности. Эти места расположены у выходов открытых горизонтальных каналов. Результаты определения мощности дозы в этих местах представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что если кто-нибудь из обслуживающего персонала и оказался бы в опасных местах, но продолжительность его пребывания не превысила бы 30 мин в год, то суммарная индивидуальная доза при этом составила бы не более 1 бэр .

Согласно измерениям, концентрация радиоактивного газа (в основном Ar^{41}) и радиоактивных аэрозолей никогда не превышала $1/10$ предельно допустимой для рабочих помещений. Из данных табл. 1 и результатов замеров концентраций радиоактивных газов и аэрозолей видно, что за дополнительной защитой реактора нет места, где суммарная доза превышала бы одну предельно допустимую годовую дозу, т. е. 5 бэр . Это также подтвердили измерения индивидуальной дозы (табл. 3). При этом дозу быстрых нейтронов определяли по числу треков в эмульсии дозиметра, заключенного в кадмиевый экран. Дозу тепловых и промежуточных нейтронов (за исключением нейтронов с энергией $7-500 \text{ кэв}$) определяли по разности треков дозиметров с кадмием и без кадмия.

Максимально возможная годовая доза облучения за дополнительной биологической защитой Таблица 1

Доза, бэр	Номер горизонтального канала *								
	1			2	4	9			11
	против пучка	60 см выше пучка	60 см ниже пучка	против пучка	против пучка	против пучка	60 см выше пучка	60 см ниже пучка	против пучка
Тепловые нейтроны	≤ 0,17	≤ 0,17	≤ 0,17	≤ 0,17	≤ 0,17	1,2	≤ 0,17	≤ 0,17	0,4
Быстрые нейтроны	2,0	2,6	2,4	≤ 0,15	≤ 0,15	2,6	3,0	1,0	2,6
γ-Излучение	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05	0,1	1,0	0,1	0,1	0,2
Суммарная доза	2,0—2,2	2,6—2,8	2,4—2,6	≤ 0,04	0,1—0,4	4,8	3,1—3,3	1,1—1,3	3,2

* Место облучения за дополнительной биологической защитой горизонтального канала.

Мощность дозы облучения за постоянной биологической защитой Таблица 2

Мощность дозы, мбэр/ч	Место облучения						
	основная биологическая защита в 30 см от центра пучка горизонтального канала				реакторная площадка		
	1	2	9	11	на крышке	на пробке вертикального канала № 5	на электромоторах аварийных стержней
Тепловые нейтроны	≤ 0,4	≤ 0,4	—	12	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,4
Быстрые нейтроны	1540	≤ 0,4	—	100	≤ 0,4	1,4	≤ 0,4
γ-Излучение	250	≤ 0,2	1160	≤ 0,2	36	36	20
Суммарная доза	1790	≤ 1	1160	112	36	37,4	20

Зарегистрированная годовая доза облучения некоторых сотрудников, находящихся в наиболее опасных местах Таблица 3

Доза, бэр	Индивидуальный номер сотрудника									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тепловые и промежуточные нейтроны	≤ 0,1	0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	0,4	0,3	≤ 0,1
Быстрые нейтроны	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
γ-Излучение	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,8
Суммарная доза	0,4—0,6	0,4—0,5	0,1—0,3	0,1—0,3	0,4—0,5	0,1—0,3	0,1—0,3	0,5—0,6	0,4—0,5	0,8—1,0

Таким образом, можно сделать вывод, что индивидуальная доза облучения, полученная одним человеком при обычной работе на реакторе ИРТ-2000 в Софии, не превышает 1 бэр $\pm 30\%$ в год (исключение составляют нейтроны с энергией 7—500 кэВ).

Для большинства сотрудников годовая доза облучения меньше этой величины. Это подтверждается также регулярным индивидуальным контролем.

Авторы благодарны М. М. Комочкову и М. И. Салацкой (ОИЯИ — Дубна) за существенную помощь при получении экспериментальных результатов и их обсуждение.

Поступило в редакцию 28/II 1972 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. I. Donev et al. Strahlentherapie, 138/2, 196 (1969).
2. Л. С. Золин, В. Б. Лебедев, М. И. Салацкая. «Атомная энергия», 13, вып. 5, 467 (1962).
3. М. И. Салацкая, В. Н. Лебедев, Л. С. Золин. «Радиационная физика», II, 407 (1964).
4. М. Г. Христова, И. Т. Мишев. «Изв. на ФИ с АНЕБ, БАН», 17, 165, (1968).

О возможности подавления циклотронной неустойчивости плазмы с помощью модулирования электронного пучка

А. Н. КАРХОВ

УДК 533.9

Известно, что замагниченная плазма с анизотропным распределением ионов по скоростям ($T_{\perp}/T_{\parallel} > 1$, T_{\perp} и T_{\parallel} — «поперечная» и «продольная» температуры) должна быть неустойчивой на ионной циклотронной частоте и ее гармониках $\omega \approx m\omega_{Hi}$, $m = 1, 2, \dots$ (см., например, обзор [1]). Эксперимент и теория указывают на важную роль затухания Ландау на электронах в раскачке циклотронных колебаний. В работе [2] показано, что даже учет простого локального условия появления этого затухания $v_{Te} \gg \frac{\omega}{k_{\parallel}}$ (v_{Te} — тепловая скорость электронов, k_{\parallel} — проекция волнового вектора на направление внешнего магнитного поля \mathbf{H}_z) позволяет хорошо объяснить экспериментальные результаты. Условие на длину волн, которые могут раскачиваться в плазме, имеющей продольный размер L , можно представить в виде

$$\frac{2\pi v_{Te}}{m\omega_{Hi}} < \lambda_{\parallel} < 2L. \quad (1)$$

В работе [3] показано, что циклотронную неустойчивость можно подавлять, отбирая энергию у колебаний с помощью внешних электродов, включенных в систему обратных связей. Однако, по-видимому, этот метод можно использовать только для подавления крупномасштабных (по сравнению с L) колебаний.

В настоящей работе предлагается использовать модулированный по плотности электронный пучок, пропускаемый вдоль \mathbf{H}_z и управляемый системой обратных связей. Скорость движения частиц v_{Π} и закон модуляции пучка необходимо подбирать такими, чтобы электроны пучка могли компенсировать возникающее вследствие неустойчивости разделение зарядов, т. е. $v_{\Pi} = \frac{\omega}{k_{\parallel}}$, где $\omega \approx m\omega_{Hi}$ — частота модуляции пучка. Покажем, что в этом случае действительно можно надеяться на подавление циклотронной неустойчивости.

Рассмотрим модельную задачу. Первоначально все ионы (протоны) движутся с одинаковой скоростью $v_0 \perp \mathbf{H}_z$, $v_{Te} = 0$. Предполагается, что плазма помещена в проводящий цилиндр радиуса a и не ограничена по z . Через плазму вдоль z проходит компенсированный

ионами электронный пучок, у которого с помощью системы обратной связи осуществляется модуляция плотности по закону

$$n_{\Pi} = \alpha' \psi e^{-i\omega(t-\tau) - i\theta - im\varphi + ik_{\parallel}z}, \quad (2)$$

где α' — коэффициент передачи системы обратной связи, который принят не зависящим от частоты; ψ — потенциал колебаний; θ — фазовый угол, задаваемый произвольно в системе обратных связей; τ — время движения пучка от электронной пушки до плазмы; φ — азимутальный угол.

Используя выражение (2), из уравнения Пуассона получаем дисперсионное уравнение циклотронных колебаний:

$$1 + \frac{\alpha e^{-i(\theta - \omega\tau)}}{k_{\parallel}^2} + \frac{k_r^2}{k_{\parallel}^2} \left(1 + \frac{\omega_{0i}^2}{\omega_{Hi}^2} \right) - \frac{\omega_{0e}^2}{\omega^2} = \frac{\omega_{0i}^2}{(\omega - m\omega_{Hi}^2)}, \quad (3)$$

где ω_{0i} , ω_{0e} — плазменные ионная и электронная частоты; $\alpha = 4\pi\alpha'$, $k_r^2 = \frac{\mu_{ml}^2}{a^2}$ (μ_{ml} — l -й нуль m -й функции Бесселя). Предполагается, что $\omega^2 \ll \omega_{He}^2$, $\omega_{0e}^2 \ll \omega_{He}^2$. При $\alpha = 0$ уравнение (3) переходит в известное дисперсионное уравнение циклотронных колебаний, из которого следует, что при $\omega_{0i}^2 \ll \omega_{Hi}^2$ колебания возбуждаются на частотах $\omega \approx m\omega_{Hi}$ и инкремент $\gamma_{\max} \ll \omega$. На основании этого результата упростим уравнение (3), заменив в левой части ω на $m\omega_{Hi}$ и приняв $\gamma_{\max}\tau \ll 1$. В результате получим упрощенное дисперсионное уравнение:

$$\omega = m\omega_{Hi} \pm \omega_{0i} \sqrt{\frac{1}{A + \frac{\alpha e^{-i(\theta - m\omega_{Hi}\tau)}}{k_{\parallel}^2}}}, \quad (4)$$

где $A = 1 + \frac{k_r^2}{k_{\parallel}^2} \left(1 + \frac{\omega_{0i}^2}{\omega_{Hi}^2} \right) - \frac{\omega_{0e}^2}{m^2\omega_{Hi}^2}$, $\omega_{0i}^2 \ll \omega_{Hi}^2$.