

## Характеристика исследуемых образцов

Сечение	$T_{\text{обл}}, ^\circ\text{C}$	$F, 10^{22}$ нейтр./см <sup>2</sup>	$\langle d_v \rangle, \text{Å}$	$N_v, \text{см}^{-3}$	$\Delta V/V, \%$
1	430	—	—	—	—
2	430	4,5	155	$4,6 \cdot 10^{14}$	0,1
3	460	8,0	170	$3,8 \cdot 10^{14}$	0,1
4	500	3,5	240	$2,5 \cdot 10^{14}$	0,2

лученной стали присутствуют дислокационные петли Франка и мелкодисперсные выделения второй фазы. Проведенное ранее [1] электронно-микроскопическое исследование шестигранных чехлов и оболочек твэлов, изготовленных из стали 1X18H10T, выявило ряд особенностей в распухании этой стали. Так, при сравнимых условиях облучения сталь 1X18H10T распухает в 5—10 раз меньше, чем сталь 0X18H9T. Это объясняется высокой плотностью мелкодисперсных выделений, роль которых сводится к уменьшению равновесной концентрации точечных дефектов. Кроме того, не обнаружено заметного различия в распухании шестигранных чехлов и оболочек твэлов.

Сопоставление этих результатов с данными по распуханию материала центрального петлевого канала показывает, что при близких условиях облучения они различаются в 5—10 раз. Это можно объяснить воздействием многочисленных и зачастую трудноконтролируемых факторов: химическим составом, предварительной термомеханической термообработкой и др. Одним из таких факторов, безусловно, является режим работы реактора, который складывался из двух периодов: 1959—1964 гг., когда в активной зоне находились твэлы из двуоксида плутония, и 1965—1971 гг., когда реактор работал с твэлами из монокарбида урана [2].

Вследствие некоторых причин эксплуатация реактора в первый период (с окисным плутониевым топливом) велась на различных мощностях и температурных режимах. За этот период реактор проработал при номинальной мощности (5000 МВт), когда температура натрия на выходе из активной зоны составляла 500—510 °С, лишь 14% общего времени работы. Время работы реактора при мощности 20—80% номинальной составила 26%, при мощности 2—20% номинальной — 39%. При этом 48, 30 и 22% времени реактор работал при температуре натрия на выходе из активной зоны

до 300, при 300—400 и >400 °С соответственно. Как видно из приведенных данных, примерно половину времени реактор работал при низкой (до 300 °С) температуре натрия, выходящего из активной зоны, причем напряженные режимы чередовались с менее напряженными.

Второй период работы реактора БР-5 (на монокарбидном топливе) характеризовался более стабильной его эксплуатацией, и большую часть времени (75%) реактор работал в режиме, близком к номинальному (мощность 4000—5000 МВт, температура натрия на выходе из реактора 450—500 °С).

Следует отметить, что все опубликованные экспериментальные данные по распуханию оболочек твэлов и шестигранных чехлов рабочих пакетов относятся лишь ко второму периоду работы активной зоны реактора БР-5 [1]. Поскольку центральный петлевой канал находился в реакторе в течение всего срока службы, облучение в начальный период велось при пониженной рабочей температуре.

Известно [3], что облучение аустенитных сталей при температуре, меньшей нижней границы образования пор (360 °С), приводит к возникновению в ее структуре большого количества мелкодисперсных фазовых выделений и дислокационных петель, которые являются стоками для точечных дефектов. Появление таких стоков несомненно может значительно снижать равновесную концентрацию точечных дефектов, в частности вакансий, что, в свою очередь, должно способствовать подавлению процесса образования и роста вакансионных пор.

Таким образом, низкотемпературное облучение исследуемой стали фактически эквивалентно предварительной холодной обработке сталей, являющейся эффективным средством подавления радиационной пористости [4].

Поступило в Редакцию 25/1 1977 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shcherbak V. e. a. «J. Nucl. Energy Soc.», 1975, v. 14, p. 145.
2. Лейпунский А. И. и др. В кн.: Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. Т. 1. Обнинск, 1968, с. 249.
3. Brager H. e. a. «Metallurgical Transaction», 1971, v. 2, p. 1893.
4. Vorobyev A. e. a. [1], p. 149.

УДК 621.386.82

## О неприменимости газохимической дозиметрии мощных импульсных электронных пучков

Фоминский Л. П., Левченко В. Ф.

Широкое применение нашли в настоящее время методы газохимической дозиметрии ионизирующих излучений и среди них такой простой метод, как отбор проб воздуха и определение поглощенной дозы по измерению в нем концентрации окислов азота, образуемых излучением [1]. Методы метановой [2] и закисной [3] дозиметрии заключаются в измерении концентрации продуктов разложения метана и закиси азота. Эти методы основаны на экспериментально установленном

факте относительной независимости выхода продуктов радиационно-химических реакций от вида и энергии ионизирующего излучения и охватывают диапазон доз от 1 до  $10^9$  рад. Так, энергетический выход реакции образования  $\text{NO}_2$  в воздухе при атмосферном давлении практически не зависит от вида излучения и составляет  $G \approx 1,5$  мол./100 эВ поглощенной энергии [1].

Обычно предполагается, что энергетический выход также не зависит и от мощности дозы. На этой основе

метод закисной дозиметрии был использован при регистрации импульсных электронных пучков, создающих мощность дозы  $\sim 10^{14}$  рад/с [4]. В связи с бурным развитием техники мощных импульсных электронных пучков с током в пучке  $\geq 1$  кА, создающим мощность дозы в газе  $\geq 10^{13}$  рад/с, вопрос о применимости методов газохимической дозиметрии к таким пучкам приобретает актуальное значение.

Известно, что энергетический выход некоторых реакций в газах сильно изменяется при наложении электрического поля. Так, при увеличении приведенной напряженности электрического поля в газе  $E/p$  от 0 до 0,2 В/(см·мм рт. ст.) выход продуктов радиационного разложения  $N_2O$  возрастает с 11,4 до 26 мол./100 эВ [5]. Увеличение выхода объясняется тем, что вторичные электроны ускоряются в газе внешним полем до энергии, достаточной для возбуждения и диссоциации молекул  $N_2O$ . Использование этого эффекта положено в основу принципа возбуждения газа электроионизационных лазеров, в которых молекулы азота возбуждаются током вторичных (плазменных) электронов, создаваемых в газе внешним ионизатором. Первые опыты по окислению азота в несамостоятельном разряде электроионизационного лазера показали возрастание  $G$  до 6 мол./100 эВ [6].

Эксперименты по окислению азота в несамостоятельном разряде с рекуперацией пучка [7] доказали, что энергетический выход  $NO_2$  резко растет с увеличением  $E/p$  вплоть до 200 В/(см·мм рт. ст.). В то же время в этих экспериментах не наблюдалось образования  $N_2O$ , которая наряду с  $NO_2$  обычно синтезируется в воздухе под действием ионизирующих излучений. Отсутствие  $N_2O$  можно объяснить ее быстрым разложением в высоких электрических полях.

Излучение мощных релятивистских электронных пучков (РЭП) показало, что условия, искусственно созданные в работе [7], существуют естественным образом на переднем фронте мощных импульсных РЭП, инжектируемых в газ [8]. Инжекция сопровождается коллективными взаимодействиями пучка с газом, приводящими к возникновению на фронте пучка волны ионизации с высокими  $E$  (до  $10^6$  В/см). В ионизированном газе возбуждается обратный ток, по порядку величины равный току пучка  $I_n$ . Сечение взаимодействия быстрых электронов с молекулами растет с уменьшением скорости, поэтому электроны обратного тока производят гораздо большее возбуждение газа, чем электроны пучка. Развитие ионно-звуковой неустойчивости обратного тока вызывает рост скоростей плазменных электронов. Помимо разогрева обратным током существен нагрев электронов плазмы в полях колебаний, возникающих за счет развития кинетической неустойчивости пучка. Пучковые неустойчивости особенно сильно проявляются при  $p \geq 1$  мм рт. ст. Они вызывают интенсивное рассеяние и торможение пучка на расстоянии, значительно меньшем длины свободного пробега релятивистских электронов в газе. Скорость возбуждения молекул электронами плазмы при этом на несколько порядков больше скорости ионизации газа пучком, следовательно, посредством возбуждения молекул может создаваться больше активных частиц, чем ионизацией. Это должно вести к увеличению выхода радиационно-химических реакций.

Параметром, определяющим характер взаимодействия пучка с газом, является отношение тока пучка  $I_n$  к предельному току Альфена  $I_A = 17\beta j$  (кА). При  $I_n/I_A \ll 1$  коллективные эффекты незначительны, а при  $I_n/I_A \geq 1$  они доминируют. Поэтому в мощных импульс-

ных РЭП величина удельного энерговклада пучка в газ, отнесенная к одному электрону пучка, выше, чем у слаботочных пучков. Выше и отношение энергии, пошедшей на возбуждение газа, к энергии, затраченной на ионизацию. В то же время выше и энергетический выход химических реакций. Следовательно, газохимическая дозиметрия мощных импульсных РЭП должна давать завышенные значения по сравнению, например, с данными, полученными по регистрации рентеновского излучения тех же пучков.

Эксперименты проводились на ускорителе «Риус-5» [9] в ИЯФ СО АН СССР. Ускоритель генерировал пучок электронов с энергией от 2,3 до 3,4 МэВ, током от 5 до 16 кА, длительностью импульса от 25 до 100 нс. Пучок направляли в цилиндрический стальной реактор ( $\phi 5 \times 18$  см,  $V = 360$  см<sup>3</sup>) с газом при атмосферном давлении. Дозу, поглощенную газом реактора, определяли методами метановой [2] и закисной [3] дозиметрии. В расчетах принимали выход водорода 5,7 мол./100 эВ при метановой дозиметрии и выход продуктов разложения записи азота 11,4 мол./100 эВ. Параллельно проводили калориметрию пучка. Затем в реакторе облучали воздух при атмосферном давлении и определяли концентрацию окислов азота методами газовой хроматографии на хроматографе «Цвет-4» и фотокалориметрическим методом по степени потемнения раствора Грисса, поглощающего окислы азота. Газом реактора поглощалась доза  $\sim 10^{20}$  эВ/г  $\approx 10^6$  рад при мощности дозы  $\sim 10^{27}$  эВ/(г·с)  $\approx 10^{13}$  рад/с. Закисная дозиметрия давала значения дозы примерно в 1,6 раз больше, чем метановая. В то же время данные закисной дозиметрии отличались от данных калориметрии на 20%. При облучении воздуха энергетический выход  $NO_2$  составлял 11 мол./100 эВ при расчете по данным калориметрии. Среди продуктов не наблюдалось  $N_2O$ , что также подтверждает близость процессов в мощных пучках и в несамостоятельном разряде.

Для сравнения тот же реактор облучали на слаботочном импульсном ускорителе «Элит-1,5» [10], генерировавшем пучок электронов с энергией 1 МэВ, током 15 А, длительностью импульса 3 мкс. В экспериментах на «Элит-1,5» результаты метановой и закисной дозиметрии совпадали с результатами калориметрии в пределах 10% при поглощенной дозе  $\sim 10^{18}$  эВ/(г·имп.)  $\approx 10^4$  рад и импульсной мощности дозы  $\sim 10^{24}$  эВ/(г·с)  $\approx 10^{10}$  рад/с. При облучении воздуха на «Элит-1,5» выход  $NO_2$  составлял 1,1 мол./100 эВ, что хорошо согласуется с литературными данными. Помимо  $NO_2$  синтезировалась  $N_2O$  с выходом до 0,8 мол./100 эВ.

У пучка «Риус-5» отношение  $I_n/I_A$  составляло от 0,055 до 0,13; а у «Элит-1,5»  $I_n/I_A = 3,2 \cdot 10^{-4}$ . Понятно, что на ускорителе «Риус-5» коллективные эффекты должны выражаться много сильнее, чем на «Элит-1,5».

Таким образом, результаты экспериментов показывают увеличение энергетического выхода химических реакций в газах при их облучении мощными импульсными электронными пучками. Следовательно, к применению газохимической дозиметрии таких пучков следует подходить осторожно. Если у слаботочных пучков коллективные эффекты незначительны, то у импульсных пучков с током пучка  $\geq 1$  кА коллективными эффектами уже нельзя пренебрегать, и газохимическая дозиметрия таких пучков дает завышенные значения поглощенной дозы.

Авторы благодарят С. Б. Вассермана и А. Н. Лукина за помощь в проведении экспериментов.

Поступило в Редакцию 15/II 1977 г.

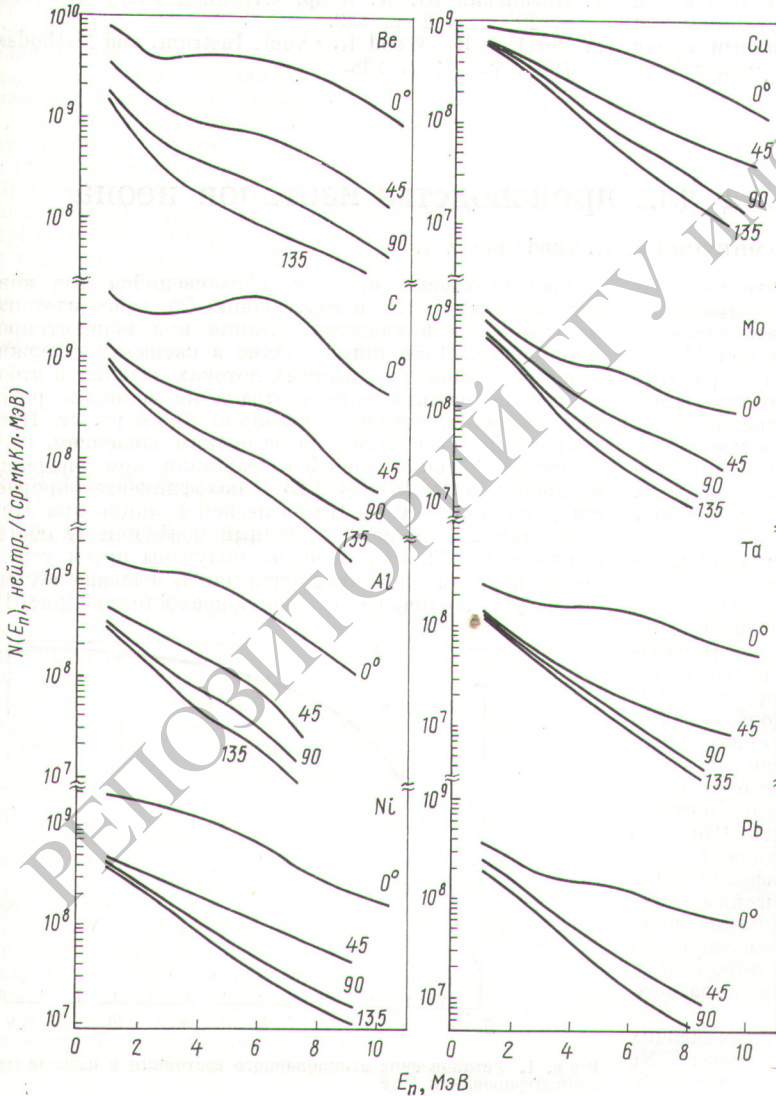
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев М. Т. «Атомная энергия», 1963, т. 15, вып. 1, с. 52.
2. Lampe F. «J. Amer. Chem. Soc.», 1958, v. 79, p. 1055.
3. Hardeck P., Dondes S. «Nucleonics», 1956, v. 14, N 3.
4. Willis C., Boud A., Miller O. «Canad. J. Chem.», 1969, v. 47, N 16, p. 3007.
5. Пшежецкий С. Я. Механизм и кинетика радиационно-химических реакций. М., «Химия», 1968.
6. Грабовский Е. В. и др. В кн.: Тезисы докл. II Всесоюзн. симп. по плазмохимии. Т. 1. Рига, «Зинатне», 1975.
7. Фоминский Л. П. «Письма в ЖТФ», 1976, т. 2, вып. 24, с. 1132.
8. Валлис Г. и др. «Успехи физ. наук», 1974, т. 113, вып. 3, с. 435.
9. Абрамян Е. А. и др. «Докл. АН СССР», 1970, т. 192, вып. 1, с. 76.
10. Абрамян Е. А., Вассерман С. Б. «Атомная энергия», 1967, т. 23, вып. 1, с. 44.

УДК 539.125.164

Энергетические спектры нейтронов из толстых мишеней, бомбардируемых дейтронами

БАДОВСКИЙ В. П., БОБКОВ В. Г., ЛЯГУШИН В. И., ПАЛКИН Г. П., ПАСЕЧНИК М. В., ПЕТРОВ Н. Н., САЛТЫКОВ Л. С.



Изучение энергетических спектров нейтронов, вылетающих из толстых мишеней, бомбардируемых заряженными частицами, представляет значительный научный и практический интерес. Такие сведения наряду с угловыми распределениями и абсолютными величинами выходов нейтронов необходимы для разработки интенсивных нейтронных источников, применяемых для радиотерапии и исследования влияния быстрых нейтронов на материалы, которые могут быть использованы в термоядерных реакторах, а также для расчетов защиты. Отсутствие необходимых экспериментальных данных, особенно по характеристикам вторичного нейтронного излучения из толстых мишеней, бомбардируемых дейтронами, приводит к тому, что такие расчеты носят приближенный характер.

В настоящей работе исследованы энергетические спектры нейтронов из толстых мишеней Be, C, Al, Ni, Cu, Mo, Ta, Pb природного изотопного состава, бомбардируемых дейтронами. В качестве ускорителя заряженных частиц использовался циклотрон У-120 ИЯИ АН УССР. Энергетические спектры нейтронов с энергией > 1 МэВ измерялись однокристалльным сцинтилляционным спектрометром с кристаллом стибена размером 30×30 мм под углами  $\theta = 0, 45, 90$  и  $135^\circ$ . В спектрометре был использован фотоэлектронный умножитель ФЭУ-13. Дискриминация  $\gamma$ -фона осуществля-

Дифференциальные энергетические распределения нейтронов из мишеней, бомбардируемых дейтронами (цифры у кривых — угловые градусы)