

медленных нейтронов не будет иметь и физического преимущества перед реактором. (Не говоря уже об экономической стороне дела.)

Привлекая сомнительную идею электро-ядерного бридинга для оправдания расходов на сооружение дорогостоящего ускорителя, можно невольно оказать плохую услугу и реакторному, и ускорительному направлениям. Полезно иметь разные ускорители, в том числе и сильноточные. Исследования, которые будут на них выполнены, могут оказаться более важными для техники и экономики будущего, чем бридинг ядерного топлива, а если потребуются производить искусственные изотопы, то на ускорителях лучше производить такие изотопы, которые не могут быть получены в реакторах.

Поступила в Редакцию 28/V 1970 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. AECL-2059, 1964; AECL-2177, 1965; AECL-2600, 1966; AECL-2750, 1967.
2. C. Millar. AECL-2177, 1965.
3. A. Weinberg. IEEE Trans. Nucl. Sci., Ns—13, No. 4 (1966).

4. А. П. Александров. «Атомная энергия», 25, 356 (1968).
5. С. М. Фейнберг. Там же, стр. 363.
6. Applied Atomic, No. 678, 4 (1968).
7. G. Bartholomew. AECL-2750, 1967.
8. J. Fraser et al. Phys. Canad., 21, 17 (1965); AECL-2177, 1965; AECL-2600, 1966; AECL-2750; 1967.
9. Р. Г. Васильков и др. «Атомная энергия», 25, 479 (1968).
10. W. Coleman, R. Alsmiller. Nucl. Sci. Engng, 34, 104 (1968).
11. P. Tunncliffe. AECL-2177, 1965.
12. P. Tunncliffe. AECL-2750, 1967.
13. F. Howard. 6-th Intern. Conf. on High Energy Acceler., 1967; ORNL-AIC-1, 1967.
14. Neutron Cross Section, BNL-325, 1965.
15. G. Ewan. AECL-2177, 1965.
16. I. Thorson. AECL-2600, 1966; AECL-2750, 1967.
17. H. Blosser. IEEE Trans. Nucl. Sci., Ns — 16, No. 3, 405 (1969).
18. L. Rosen. Proc. 6-th Intern. Conf. on High Energy Acceler., 1967, p. 237.
19. E. Courant. Annual Rev. Nucl. Sci., 18, 435 (1968).
20. С. М. Фейнберг, О. М. Ковалевич. В сб. «Состояние и перспективы работ по созданию АЭС с реакторами на быстрых нейтронах». Т. 1, 1967, стр. 165.
21. G. Bartholomew. AECL-2177, 1965.

## Высокопоточные стационарные исследовательские реакторы и их перспективы

С. М. ФЕЙНБЕРГ

УДК 621.039.572

В течение последних десяти лет ядерная технология сделала значительный шаг вперед, что позволило существенно увеличить интенсивности стационарного потока нейтронов в исследовательских реакторах. Были достигнуты небывалые ранее плотности энерговыделения в активной зоне порядка  $(3-5) \cdot 10^3$  квт/л при поверхностных тепловых нагрузках порядка  $(5-6) \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. В результате потоки быстрых ( $E \geq 1$  Мэв) и тепловых нейтронов достигли соответственно  $\sim 1 \cdot 10^{15}$  и  $\sim 5 \times 10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. Эти значения впервые были получены в 1962 г. на исследовательском реакторе нового типа СМ-2 с активной зоной на промежуточных нейтронах, с водяными замедлителем и теплоносителем.

В настоящей статье подводятся некоторые итоги опыта эксплуатации этого реактора и обсуждается вопрос о путях дальнейшего повышения интенсивности стационарного потока тепловых нейтронов до  $10^{16}-10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек и выше.

### Опыт работы реактора СМ-2

Потребности эксперимента диктуют необходимость постоянного увеличения интенсивности потоков тепловых и быстрых нейтронов в исследовательских реакторах.

В течение десятилетия (1955—1965 гг.) интенсивность потоков тепловых нейтронов в исследовательских реакторах возросла от  $3 \cdot 10^{14}$  до  $3 \cdot 10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек, и сейчас выдвигаются задачи дальнейшего увеличения потока до  $(2-5) \cdot 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Вместе с тем в настоящее время появились сильные конкуренты, вытесняющие исследовательские реакторы в таких областях, как, например, измерение резонансной структуры ядерных уровней. Это ускорители с большими токами заряженных частиц, конвертируемых в нейтронное излучение на мишенях.

Характерным примером может служить ускоритель, проект которого опубликован канадскими учеными [1], с потребляемой электриче-



ской мощностью  $\sim 10^5$  кВт, создающий в тяжелой водном замедлителе потоки нейтронов  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек путем конверсии протонов с энергией порядка 1000 Мэв в тяжелой мишени.

В соответствии с растущими потребностями водо-водяные исследовательские реакторы развиваются в направлении повышения общей мощности и особенно удельной плотности генерации нейтронов в активной зоне.

Если 10 лет назад плотность энерговыделения в активной зоне составляла  $\sim 50$  кВт/л, то сейчас она достигла 500 кВт/л в Брукхейвенском реакторе и 2500 кВт/л в реакторе СМ-2 в Мелекесе. Оказалось, что для реакторов, работающих на промежуточных нейтронах, достижима очень высокая удельная энергонапряженность. В результате достигается высокая плотность тепловых, быстрых и промежуточных нейтронов. Активная зона такого реактора является мощным и компактным источником быстрых нейтронов. Если такую активную зону окружить хорошим замедлителем (например, Ве или D<sub>2</sub>O), то в нем можно получить высокую плотность потока тепловых нейтронов. Внутри самой активной зоны можно создать ловушку нейтронов — водяную полость с высоким потоком тепловых нейтронов. Преимуществом реактора на промежуточных нейтронах является также возможность широко варьировать спектр нейтронов, падающих на облучаемый образец, изменяя его положение в реакторе.

На Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958) в связи с нашим докладом «Реактор на промежуточных нейтронах для получения потоков нейтронов высокой интенсивности» [2] впервые обсуждался вопрос о применении описанного выше нового типа реактора для исследовательских целей; там же был представлен американский доклад «Предварительный проект исследовательского реактора на надтепловых нейтронах с высокой плотностью потока» [3], в котором обсуждался физический аспект аналогичной задачи. Однако представители американской делегации высказали мнение, что эти реакторы не будут иметь преимуществ по сравнению с реакторами на тепловых нейтронах. Сопоставление нашего и американского проектов позволило выяснить причину такого диаметрального расхождения в водах.

Высокое значение качества  $J$  (отношение потока тепловых нейтронов к мощности реактора) достигается только при максимальном

сокращении объема активной зоны. В реакторе на промежуточных нейтронах легче применить высококачественные конструкционные материалы, которые однако, сильно поглощают нейтроны. Это позволяет развить поверхности охлаждения в единице объема за счет сокращения толщины твэлов и при этом увеличить тепловую нагрузку единицы их поверхности. Следовательно, в конечном счете можно значительно увеличить удельную мощность, т. е. скорость деления в единице объема активной зоны. Без увеличения удельной мощности нельзя достигнуть выигрыша качества  $J$  по сравнению с тепловым реактором.

В американском докладе предлагался вариант устройства активной зоны с твэлами на базе алюминиевых сплавов, значительно более толстыми и несущими меньшую поверхностную тепловую нагрузку.

Неучет связи между физическими и инженерными возможностями привел к заключению о неэффективности исследовательского реактора с водяным замедлителем на промежуточных нейтронах [4].

Реализацией идей доклада [2] явился проект [5] исследовательского реактора СМ с тепловой мощностью 50 Мвт, который вступил в эксплуатацию в ноябре 1962 года [6]. Опыт эксплуатации реактора СМ-2 подтвердил правильность основных физических и инженерных идей, заложенных в проект:

1) был достигнут поток тепловых нейтронов в ловушке около  $3 \cdot 10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек при мощности 50 Мвт;

2) поток быстрых нейтронов с энергией больше 1 Мэв в активной зоне превысил  $10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек;

3) была достигнута максимальная тепловая нагрузка в активной зоне  $4,5 \cdot 10^3$  кВт/л при коэффициенте неравномерности  $\sim 3$  по активной зоне;

4) твэлы оказались вполне работоспособными при рекордной для реакторной техники тепловой нагрузке  $6 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. Как показал опыт, эта нагрузка может быть удвоена. При этом допустимая глубина выгорания превышает 35%;

5) основные инженерные узлы реактора — система охлаждения, система перегрузки, СУЗ и т. п. — оказались вполне работоспособными.

В настоящее время рассматривается проект повышения мощности реактора.

Успешный опыт эксплуатации реактора СМ-2 стимулировал разработку нескольких исследовательских реакторов с активной зоной



на эпитепловых и промежуточных нейтронах и с высокой интенсивностью потока тепловых нейтронов. К ним относятся: HFBR — тяжеловодный реактор мощностью 40 Мвт с максимальным потоком тепловых нейтронов  $7 \cdot 10^{14}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек; HFJR — легководный реактор мощностью 100 Мвт с максимальным потоком тепловых нейтронов  $5,5 \cdot 10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек; AARR — легководный реактор мощностью 100 Мвт с максимальным потоком тепловых нейтронов  $4 \cdot 10^{15}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Дальнейшего развития «петлевого» реактора на промежуточных нейтронах типа CM-2 предполагается достичь путем повышения теплонапряженности единицы объема активной зоны и разработки новых твэлов. По предварительным оценкам, задача получения потока тепловых нейтронов в ловушке  $\sim (2-3) \cdot 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек представляется разрешимой, хотя это и потребует проведения длительного эксперимента и исследовательской работы.

### Перспективы достижения высоких потоков нейтронов на исследовательских реакторах

В последние пять лет на исследовательских реакторах успешно осваиваются стационарные потоки тепловых нейтронов в диапазоне  $10^{15} - 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. Достижение интенсивности потока тепловых нейтронов  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек можно считать технически обеспеченным. С другой стороны, как мы уже отмечали выше, появились сильные конкуренты «с будущим» — ускорители быстрых заряженных частиц, конвертируемых в нейтроны на мишенях. Поэтому кажется целесообразным провести обсуждение двух направлений: 1) сравнение реакторов и ускорителей как стационарных источников нейтронов при интенсивности потока тепловых нейтронов около  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек; 2) перспективы дальнейшего роста интенсивности потока нейтронов в реакторах до  $10^{16} - 10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Первый вопрос можно сейчас рассмотреть, поскольку имеется публикация о проекте SOC [1] и приведенные выше данные по проекту реактора типа CM-2.

Напомним, что проект SOC предполагает сооружение предложенного Расселом циклотрона с разделенными орбитами, дающего пучок протонов с энергией 970 Мэв интенсивностью 65 ма. Ускоритель потребляет мощность от электрической сети 130 Мвт. Пучок прото-

нов падает на мишень из висмута, длина которой 60 см и диаметр 10 см, где протоны конвертируются в быстрые нейтроны. Висмутовая мишень помещается в цилиндрический тяжеловодный замедлитель высотой 300 см и диаметром 250 см, в котором формируется поле тепловых нейтронов с максимумом интенсивности  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. Предположительная стоимость сооружения и эксплуатации, заимствованная из работы [1], приведена нами в сравнительной таблице.

Сравнение затрат (10<sup>6</sup> долл.) для получения интенсивности потока тепловых нейтронов  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек

Затраты	SOC	CM
Капитальные затраты	65	10
В том числе:		
ускоритель	40	—
реактор	—	4
Эксплуатационные затраты в год	7,5	2,5
В том числе:		
электроэнергия при цене 35 долл/квт	4,5	0,1
твэлы при цене ядерного горючего 18 долл/г	—	+2,5
издержки на топливо с учетом возврата при цене ядерного горючего 12 долл/г и стоимости радиохимического процесса 1 долл/г	—	1,4

Интенсивность потока тепловых нейтронов  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек довольно легко достижима на реакторе типа CM-2 с ловушкой нейтронов и водяными замедлителем и теплоносителем. При размерах активной зоны диаметром 33 см и высотой 35 см с заполненной водой полостью ловушки нейтронов диаметром 12 см и бериллиевым отражателем поток тепловых нейтронов в ловушке достигнет  $10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек при тепловой мощности реактора 100 Мвт. При этом скорость охлаждающей твэлы воды в активной зоне составит  $\sim 12$  м/сек и максимальная тепловая нагрузка на поверхности твэла —  $12 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. Напомним, что пластинчатые твэлы типа CM-2 прошли успешные испытания в реакторе CM-2 при тепловых нагрузках такого порядка и глубине выгорания до 30%. Приведенные выше данные соответствуют глубине выгорания  $U^{235}$  в твэлах, равной 25%; рассматривается стационарный режим квазинепрерывной перегрузки реактора, предусмот-



ренный в конструкции реактора СМ-2. Годовое потребление составит  $\sim 140$  кг  $U^{235}$  при сжигании его около 40 кг (300 эффективных суток работы в год).

В таблице сравниваются затраты на два проекта СОС и СМ.

Приведенное сравнение показывает, что ускоритель для получения стационарных потоков тепловых нейтронов с интенсивностью  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек намного уступает реактору. Правда, ускорительный источник нейтронов помещен внутри замедлителя, в то время как ловушка размещена внутри реакторного источника нейтронов; поэтому сравниваются разные по экспериментальным возможностям установки: первая более удобна для получения «пучков» нейтронов, а вторая — для облучения изотопов, например, для получения трансуранивых элементов.

Однако следует указать на значительные трудности, которые возникнут в ускорительном источнике для защиты и сепарации от нейтронов и других возникающих в нем излучений с высокой энергией.

Конечно, надо иметь в виду, что техника ускорителей в настоящее время, как кажется, развивается гораздо более высокими темпами, чем техника реакторов. Вместе с тем техническая подготовленность реакторостроения для получения потоков  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек выглядит более убедительно. Во всяком случае, на сегодняшний день достичь стационарной интенсивности потока тепловых нейтронов  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек на реакторах можно более простым и дешевым способом, чем на ускорителях. Как быстро такая ситуация изменится, зависит от «живого» процесса конкурентного развития и прогресса сравниваемых направлений.

Возможно, что при росте интенсивности потоков нейтронов до  $10^{17}$ – $10^{18}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек ускорители вытеснят реакторы. Мы переходим, таким образом, к обсуждению второго вопроса: о перспективах повышения стационарных потоков нейтронов в реакторах.

В реакторах типа СМ-2 с неподвижной гетерогенной активной зоной дальнейшее повышение потока нейтронов можно осуществить путем увеличения удельной мощности активной зоны. Для получения потока тепловых нейтронов в ловушке порядка  $10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек максимальная удельная мощность активной зоны должна быть порядка 100 тыс. кет/л, что кажется сегодня трудно достижимым, хотя и не невозможным. При этом значительно возра-

стут температурные градиенты внутри твэла. Для предупреждения кризиса теплосъема придется значительно увеличить скорости воды, повысить давление в первом контуре и пойти на дальнейшее уменьшение толщины твэла. Напомним, что пластинчатые твэлы СМ-2 имеют сердечники толщиной 0,5 мм и покрытия толщиной 0,15 мм. Следует сократить толщину сердечника вдвое, а толщину покрытия уменьшить до 0,1 мм, имея в виду сокращение времени кампании твэла на порядок. Таким образом, толщина пластинчатого твэла составит 0,45 мм при толщине водяного зазора между соседними твэлами 0,8 мм. При таком решении конструкции активной зоны максимальная теплонапряженность на поверхности твэла достигнет  $\sim 50 \cdot 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>·ч. Для предупреждения кризиса теплосъема потребуется скорость потока воды  $\sim 40$  м/сек. Возникает сложная проблема создания твэла, который, несмотря на малую толщину, будет устойчив при таких скоростях воды и больших перепадах давления вследствие возрастания сопротивления трения в активной зоне в десятки раз. Решение этой трудной задачи, как уже упоминалось, будет облегчаться тем, что длительность кампании твэла сократится до 2–3 суток. Хотя требуется проведение большого комплекса исследований для решения поставленной задачи, однако она не кажется неразрешимой.

Другим возможным вариантом для получения стационарного потока тепловых нейтронов может быть гетерогенный реактор, в котором активная зона образована из материала с малыми сечениями поглощения тепловых нейтронов. Этот вопрос был рассмотрен еще Эргженом [7]. По предложению Ю. Г. Николаева [8] был разобран вариант реактора с тяжеловодным охладителем и отчасти замедлителем и твэлами из бериллия, который является также частично замедлителем. С физической точки зрения такой реактор можно рассматривать как гомогенный, если шаг решетки будет много меньше длины замедления и длины диффузии нейтронов, что, конечно, в данном случае имеет место. Для интенсификации теплосъема толщину пластинчатых или диаметр цилиндрических твэлов следует выбрать равными  $\sim 1$  мм. Оценки, которые были сделаны, носят весьма предварительный характер. Диаметр активной зоны оказывается равным  $\sim 1$  м, и при скоростях воды  $\sim 10$  м/сек достигается интенсивность теплосъема в объеме активной зоны порядка нескольких тысяч киловатт на литр. Высказывается предположение, что ограничи-



вающим фактором окажутся температурные напряжения, возникающие в твэлах.

Вследствие очень малой величины критической загрузки ядерного горючего выгорание его происходит очень быстро. Например, по одной оценке, поток  $10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек достигается при тепловой мощности реактора  $2 \cdot 10^6$  квт, и при принятой в оценке глубине выгорания ядерного горючего время кампании оказывается равным  $\sim 15$  мин. Конечно, такое необыкновенное сокращение времени кампании требует необычного устройства реактора, в котором практически непрерывно должно заменяться ядерное горючее. Интересно отметить, что при таких временах кампании, много меньших времени радиоактивного распада яода, отравление реактора ксеноном почти исчезает.

По-видимому, в реакторе такого типа интенсивность потока тепловых нейтронов  $10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек достижима. Однако мощность реактора значительна, и, что следует подчеркнуть, при одинаковой мощности реакторов типа СМ и гомогенного вследствие мягкости спектра нейтронов скорость накопления трансурановых изотопов будет много меньше, так же как и интенсивность потоков быстрых нейтронов. С другой стороны, значительно большие размеры активной зоны и отражателя открывают соответственно большие возможности для вывода пучков нейтронов. Очень важно, что качество гомогенного реактора оказывается вдвое-втрое ниже качества реактора типа СМ.

Возможно, что еще далеко не исчерпаны перспективы улучшения качества реакторов типа СМ и других систем. А. С. Коченовым [9] сделаны оценки предельных значений качества реактора с гомогенной активной зоной и реактора с ловушкой. Качество гомогенного реактора (при равномерном распределении  $U^{235}$  по активной зоне) не может превысить  $10^{11}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек·квт. В реакторах с легководной ловушкой и отражателем из бериллия для активной зоны водо-водяного типа значение качества в три раза выше, чем для гомогенного реактора.

В лучших современных реакторах (СМ-2 и НРJR) качество составляет  $\sim 5 \times 10^{10}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек·квт, т. е. в шесть раз ниже предельного значения. Следовательно, имеется принципиальная возможность в реакторах типа СМ-2 значительно увеличить поток тепловых нейтронов при сохранении мощности реактора.

Имеются ли возможности получения в реакторах стационарного потока нейтронов больше

$10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек? Что будет ограничивать такое увеличение интенсивности?

Вопрос о пределах потока нейтронов в реакторах, если ограничиться величиной нагревания составляющих активной зоны порядка  $0,3$  эв/атом, был рассмотрен Я. В. Шевелевым [10]. Интенсификация потока нейтронов до уровня  $\sim 10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек в принципе не встречает препятствий. В работе [9] также указывается, что при организации встречных потоков теплоносителя можно еще больше увеличить поток нейтронов. Таким образом, по сравнению с современным уровнем  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек имеется принципиальная возможность увеличения интенсивности потока тепловых нейтронов на 3—4 порядка без перехода к устройству плазменных реакторов, т. е. при сохранении активной зоны реактора в твердом или жидком состоянии. В работе [9] не рассматривается вопрос о влиянии общей мощности реактора и его качества, что мы обсудим ниже.

Основным препятствием для повышения интенсивности потока нейтронов до  $10^{18}$ — $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек являются не технические трудности, а экономические. При росте потока нейтронов пропорционально при неизменном качестве  $J$  возрастает общая мощность реактора  $Q = \Phi/J$ . Наиболее высокое качество реактора (типа СМ-2), известное в настоящее время, составляет  $J \approx 10^8$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек·квт. Следовательно, мощность реактора для получения потока нейтронов  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек достигнет  $10^{19}/10^8 = 10^{11}$  вт =  $10^8$  квт. Эксплуатация такого реактора будет стоить более  $2 \cdot 10^9$  долл. в год при стоимости установки порядка нескольких миллиардов долларов. Конечно, такие затраты, несмотря на их астрономическую величину, нельзя считать невозможными, однако очевидно, что должны быть выдвинуты научные или технические задачи, которые могли бы оправдать эти огромные затраты.

Отвлекаясь теперь от экономической стороны дела, рассмотрим техническую осуществимость проектов получения стационарной интенсивности потоков тепловых нейтронов  $10^{18}$ — $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек.

Если форсирование интенсивности и тепловой мощности в гетерогенном реакторе для достижения указанной цели встретит непреодолимые технические трудности, то мы обратимся к активной зоне с гомогенным раствором или взвеси ядерного горючего в теплоносителе или теплоносителе-замедлителе. Альтернативой такого решения задачи может быть циклотел [11]. В последнем либо активная зона движется



по отношению к неподвижному замедлителю, служащему источником нейтронов, либо замедлитель — источник нейтронов — с мишенью, в которых генерируется интенсивное поле нейтронов, движущееся вдоль активной зоны; в активной зоне бежит нейтронная волна вспышки со скоростью, равной скорости движения мишени.

Простейшая схема такого циклотла может быть представлена как последовательность из  $N$  импульсных, например гомогенных, уран-графитовых реакторов, расположенных вдоль окружности. Мишень может двигаться внутри торообразной трубки, проходящей через центры активных зон этих  $N$  импульсных реакторов. Когда движущаяся в торообразной трубке мишень попадает в один из реакторов, в нем системой соответствующим образом настроенных СУЗ возбуждается импульс цепной реакции. Время прохождения мишени через данный реактор должно быть равно времени импульса нейтронов в нем.

Такое устройство обеспечит поток нейтронов в мишени, равный интенсивности потока нейтронов в импульсном уран-графитовом реакторе, т. е. величину потока  $\sim 10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. Мощность всего циклотла, т. е. мощность  $N$  импульсных реакторов, составит  $Q = \Phi/J$ . Однако средняя тепловая мощность каждого из импульсных реакторов  $q$ , очевидно, составит только  $q = Q/N$ . В этом уменьшении средней удельной мощности активной зоны в  $N$  раз и заключается выигрыш, достигаемый устройством циклотла.

Таким образом, чем больше  $N$ , тем проще устройство системы охлаждения каждого из импульсных реакторов. Дополнительный выигрыш заключается в том, что уменьшение удельной мощности активной зоны может привести к увеличению качества  $J$ , так как обычно увеличение удельной мощности приводит к снижению качества реактора. Например, желая снизить удельную мощность активной зоны в 1000 раз, надо выбрать  $N = 1000$ , т. е. выставить по окружности циклотла 1000 импульсных реакторов. При этом средняя мощность каждого из них составит примерно несколько сотен тысяч киловатт, если стационарный поток нейтронов на мишени будет равен  $\sim 10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек. На первый взгляд может показаться, что имеется очень большой рост расходов на устройство активной зоны. Это не так. При столь колоссальной мощности реактора, порядка сотен миллионов киловатт, расход ядерного горючего огромен: если бы мы

могли без потери в качестве достигнуть этой мощности в одной из 1000 активных зон импульсных реакторов, образующих циклотел, то эта активная зона выгорала бы на 25% за время, меньшее 1 ч.

Заметим, что для получения стационарного потока нейтронов  $\sim 10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек экономически выгодным будет устройство циклотла с  $N \approx 10\ 000$  и более. При этом скорость перемещения мишени будет достигать сотен метров в секунду.

Конечно, описанная выше конструкция циклотла представляет простейшую схему. Вероятно, лучшей будет система, в которой вдоль протяженной торообразной активной зоны будет бежать волна цепной реакции и вместе с ней двигаться мишень, облучаемая нейтронами. Возможно, будет удобнее перемещать импульсные реакторы при неподвижной мишени.

Резюмируем вышесказанное:

1. Ядерные реакторы как источники стационарного потока нейтронов  $\sim 10^{16}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек значительно экономичнее проектируемых ускорителей. Конечно, как импульсные источники нейтронов ускорители имеют специфические преимущества благодаря кратковременности импульса.

2. Интенсивность потока тепловых нейтронов  $\sim 10^{17}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек может быть достигнута путем сооружения традиционных гетерогенных реакторов типа СМ или реактора с сильно разведенной активной зоной, тяжеловодным замедлителем-теплоносителем и уран-бериллиевыми твэлами. Достижение таких потоков на реакторах типа СМ представляется сложной задачей, однако решение ее кажется возможным. Преимуществами реакторов типа СМ являются большой поток быстрых и резонансных нейтронов и более высокое качество реактора.

3. Технические возможности повышения интенсивности стационарного потока тепловых нейтронов до  $10^{18}$  и даже  $10^{19}$  нейтр/см<sup>2</sup>·сек не вызывают сомнения, если отвлечься от огромной стоимости таких установок. Вероятно, наиболее эффективное решение такой задачи — это сооружение циклотла, который позволяет кардинально упростить систему теплоотвода и, возможно, выиграть в качестве реактора.

4. Главной трудностью при создании реакторов с очень большой интенсивностью потока нейтронов является рост общей мощности, делающий их сооружение и эксплуатацию чрезвычайно дорогими. Поэтому увеличение качества реакторов такого назначения следует



рассматривать как главную задачу прогресса этих реакторов. Более высокое качество следует рассматривать как основной параметр, определяющий выбор реактора.

Поступила в Редакцию 28/V 1970 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Intense neutron generator for CRNL, Canad. Nucl. Technol., 3, 43 (1964).
2. С. М. Фейнберг и др. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Доклады советских ученых. Т. 2, М., Атомиздат, 1959, стр. 334.
3. T. Auerbach et al. Доклад № 424, представленный США на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
4. С. М. Фейнберг. Сборник «Действие ядерных излучений на материалы», М., Изд-во АН СССР, 1962.
5. С. М. Фейнберг и др. «Атомная энергия», 8, 493 (1960).
6. С. М. Фейнберг и др. Доклад № 320, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
7. W. Eggen. Доклад № 628, представленный США на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
8. В. В. Гончаров. Доклад № 296, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).
9. А. С. Коченов. «Атомная энергия», 26, 449 (1969).
10. Я. В. Шевелев. См. [8], доклад № 374.
11. С. М. Фейнберг. Устное сообщение на Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).

Подписывайтесь

на

«УКРАИНСКИЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ»

В журнале публикуются статьи о новых результатах теоретических и экспериментальных исследований в области ядерной физики, физики полупроводников, радиофизики и электроники, физики плазмы, физики низких температур, физической оптики, металлофизики и пр., а также научная хроника.

Журнал издается на русском и украинском языках с резюме на английском языке. Объем номеров русского и украинского — 15 печатных листов.

Рассчитан на работников научно-исследовательских учреждений, преподавателей институтов и техникумов, студентов физических факультетов.

При подписке на журнал на украинском языке ссылаться на индекс 74500, а при подписке на русском языке — на индекс 74501. Подписку можно оформить у общественных распространителей печати, в пунктах подписки «Союзпечати», а также в любом почтамте и отделении связи.

Подписная цена: на год — 10 руб. 80 коп., на полгода — 5 руб. 40 коп., цена одного номера 90 коп.