

Показано, что отклонения экспериментальных значений  $\lg R_r$ ,  $\lg R_t$ ,  $\lg R_{из}$  от получаемых по формулам (4), (9) — (12) распределены по закону, близкому к нормальному (доверительная вероятность  $1 - p$  при проверке по критерию хи-квадрат не менее 0,5). Среднее квадратическое отклонение экспериментальных значений  $\lg R_{из}$  от получаемых по формуле (4) с использованием формул (9) — (12) соответствует изменению  $R_{из}$  ЭД в 1,7 раза в большую или меньшую сторону. Это значение для ЭД меньше, чем для кабеля, так как обрабатывались данные испытаний в одном реакторе и использовались ЭД только отечественного производства.

Пределы применимости формул (9) и (11): по температуре — от 80 до 800 °С, по плотности потока тепловых нейтронов — от  $1,7 \cdot 10^{12}$  до  $8,5 \cdot 10^{13}$  нейтр./см<sup>2</sup>·с, по флюенсу тепловых нейтронов [только для формулы (11)] от  $10^{18}$  до  $1,2 \cdot 10^{21}$  нейтр./см<sup>2</sup>.

Изложенный метод обработки результатов экспериментов и расчетов, аналогичный в общих чертах методам анализа реакторно-физического эксперимента [46], позволяет, получив общее аналитическое выражение, представить всю имеющуюся экспериментальную и расчетную информацию о рассматриваемой величине в наглядном и легко обозримом виде. Полученные для кабелей и ЭД соотношения могут быть использованы при разработке новых конструкций ЭД и ионизационных камер.

УДК 533.9.924:539.12.04:621.039.616

## Блистеринг нержавеющей стали 0X16N15M3B при одновременном облучении ионами дейтерия и гелия

ВЛАДИМИРОВ Б. Г., РУСЕВА М. И., ИОНОВА Е. С., МАНСУРОВА А. Н., МАРТЫНЕНКО Ю. В., РЯЗАНОВ А. И.

К настоящему времени экспериментально изучены основные закономерности радиационного блистеринга [1—4]. Следует, однако, отметить, что подавляющее большинство исследований выполнено для одного вида ионов, хотя в реальных условиях термоядерного реактора первая стенка будет подвержена облучению ионами изотопов водорода и гелия одновременно. Уже сейчас ясно, что на блистеринг в значительно большей степени, чем на другие процессы на поверхности стенки, будет влиять эффект синергизма при совместном воздействии различных компонентов излучения плазмы. В частности, первые опыты по одновременной имплантации в никель ионов  $D^+$  и  $He^+$  выявили уменьшение критической дозы, вызывающей образование блистеров [5].

Исследования радиационного повреждения поверхности нержавеющей стали 0X16N15M3B про-

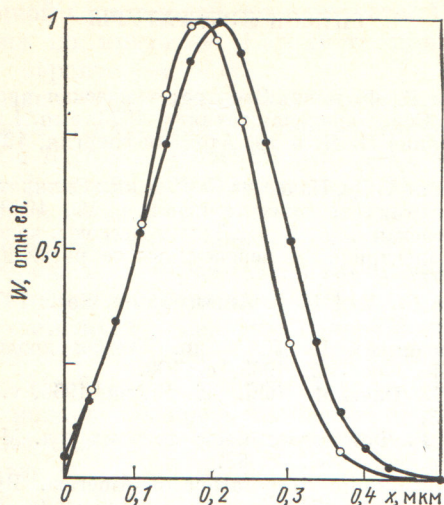
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сучков В. Ф. и др. Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника, 1973, вып. 1 (95), с. 3.
2. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1974, т. 37, вып. 1, с. 72.
3. Нейшмин А. Д., Пальгуев С. Ф. В кн.: Силикаты и окислы в химии высоких температур. М., 1963, с. 253.
4. Дешковская А. А. В кн.: Труды Всесоюз. конф. «Физика диэлектриков и перспективы ее развития». Т. 1, Л., 1973, с. 193.
5. Osburn C., Vest R. J. Amer. Ceram. Soc., 1974, v. 54, N 9, p. 428.
6. Богородицкий Н. П. и др. Теория диэлектриков. М.—Л., Энергия, 1965, с. 108.
7. Dau G., Davis M. Nucl. Sci. Engng, 1966, v. 25, N 3, p. 223.
8. Бьюб Р. Фотопроводимость твердых тел. М., Изд-во иностр. лит., 1962, с. 88.
9. Rose A. Radio Corporation of America. RCA Rev., 1951, v. 12, p. 362.
10. Fowler J. In: Proc. of the Royal Society, 1956, v. A-236, p. 464.
11. Емельянов И. Я. и др. Атомная энергия, 1977, т. 42, вып. 5, с. 403.
12. Stringer J. e.a. Nucl. Technol., 1973, v. 17, N 1, p. 71.
13. Lynch G., Shields R. AECL-4827, Chalk River, 1974.
14. Ивахненко А. Г. и др. Принятие решений на основе самоорганизации. М., Сов. радио, 1976.
15. Шор Я. Б. Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М., Сов. радио, 1962, с. 100.
16. Вальков А. А., Воропаев А. И., Юрова Л. Н. Анализ реакторно-физического эксперимента, М., Атомиздат, 1977, с. 3, 10.

Поступила в Редакцию 06.08.79

водили при одновременном и последовательном облучениях ионами дейтерия и гелия энергией 20 и 40 кэВ соответственно при температуре облучения 500 и 200 °С. Образцы для облучения вырезали из фольги, полученной путем многократной прокатки с промежуточными отжигами при 850 °С в течение 30 мин. После последней прокатки фольгу отжигали при 1050 °С в течение 30 мин. Размер зерна после обработки составлял 30—50 мкм. Электрически полированные образцы аустенитной нержавеющей стали 0X16N15M3B облучали ионами  $He^+$  и  $D^+$  в ускорителе ИЛУ-3 [6]. Для выявления роли синергизма было проведено пять серий экспериментов:

- 1) облучение ионами  $D^+$  энергией 20 кэВ;
- 2) облучение ионами  $He^+$  энергией 40 кэВ;
- 3) одновременное облучение ионами  $D^+$  энергией 20 кэВ и  $He^+$  энергией 40 кэВ;

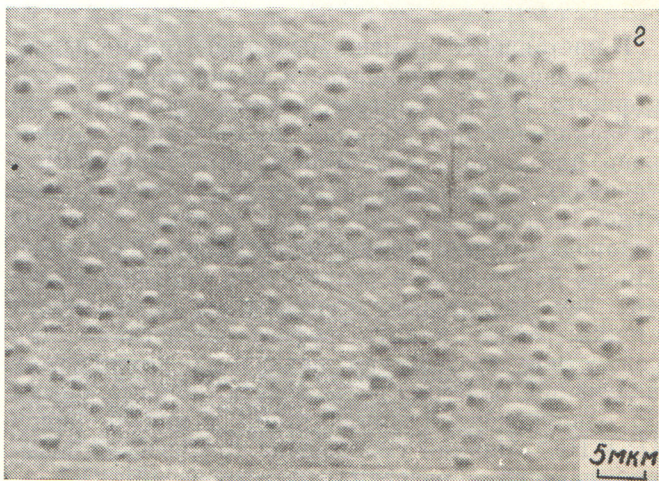
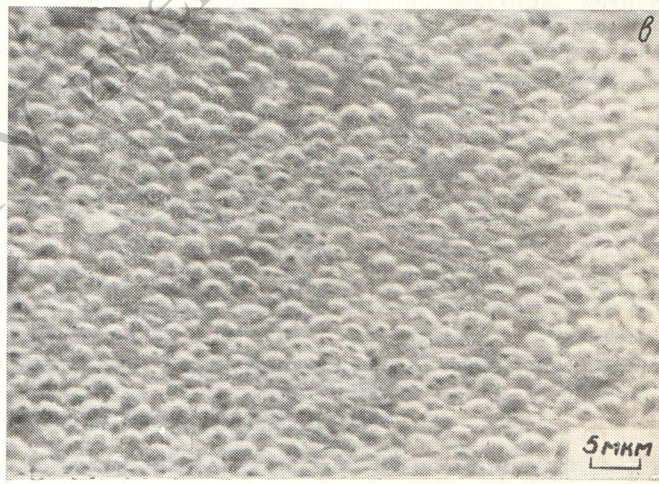
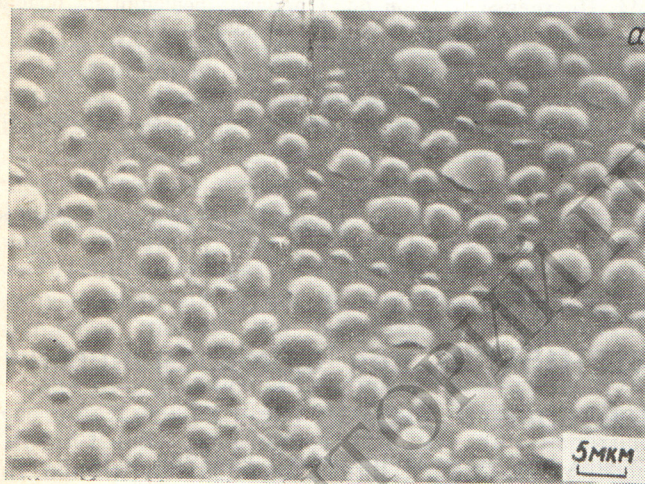


Р и с. 1. Профили распределения остановившихся 20-кэВ ионов  $D^+$  (●) и 40-кэВ ионов  $He^+$  (○) в никеле

4) последовательное облучение ионами  $D^+$  энергией 20 кэВ и ионами  $He^+$  энергией 40 кэВ;

5) последовательное облучение сначала ионами  $He^+$ , а потом ионами  $D^+$ .

Во всех экспериментах дозы облучения составляли  $10^{18}$  и  $6 \cdot 10^{18}$   $см^{-2}$  для ионов гелия и дейтерия соответственно. Скорость набора дозы составляла  $5,4 \cdot 10^{14}$  для ионов  $D^+$  и  $1,8 \cdot 10^{14}$   $см^{-2} \cdot с^{-1}$  для ионов  $He^+$ . Следует отметить, что ионами  $D^+$  одновременно облучали три образца из серий 1, 4 и 5, а ионами  $He^+$  — два образца из серий 2 и 4. Каждая серия экспериментов осуществлялась при двух значениях температуры мишеней 200 и 500 °С, контролируемых термопарой. Как известно, бомбардировка Fe — Cr — Ni-сталей и сплавов ионами гелия при  $T = (0,1-0,4) T_{пл}$  приводит к развитию флексинга [4], а при  $T \approx (0,4-0,45) T_{пл}$  наблюдается блистеринг. Электронно-микроскопические исследования поверхностей облученных мишеней проводили на сканирующем электронном микроскопе «Stereoskan-180».

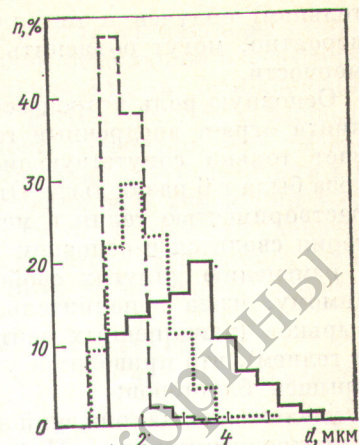


Р и с. 2. Микроструктура поверхности нержавеющей стали 0X16N15M3B после облучения при 500° С

Рис. 1 иллюстрирует рассчитанные на ЭВМ распределения в никеле затормозившихся ионов D<sup>+</sup> энергией 20 кэВ и ионов He<sup>+</sup> энергией 40 кэВ. Видно, что пробеги ионов D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> практически совпадают. На рис. 2 представлены микрофотографии поверхности нержавеющей стали после облучения ионами He<sup>+</sup> (а), ионами D<sup>+</sup> (б), одновременно ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (в) и, наконец, последовательно ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (г). В соответствии с ранее полученными данными [4] в процессе облучения при  $T \approx 0,45T_{пл}$  на поверхности образцов наблюдается блистеринг, причем большинство блистеров имеют неповрежденные оболочки. Плотность блистеров и их диаметр существенно зависят от условий имплантации ионов D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup>. Минимальный размер (0,5 мкм) и минимальная плотность блистеров в теле зерна ( $\sim 5 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$ ) наблюдаются при бомбардировке ионами D<sup>+</sup> (см. рис. 2, б). Максимальный размер (до 6 мкм) блистеров, образующихся как в теле зерна, так и на границе зерен, обнаруживается при облучении ионами He<sup>+</sup> (см. рис. 2, а). Имплантация ионов D<sup>+</sup> перед внедрением ионов He<sup>+</sup> приводит к уменьшению диаметра блистеров и увеличению их плотности (см. рис. 2, г и рис. 2, а). Это хорошо видно из рис. 3, на котором показано рассчитанное для микрофотографий рис. 2 распределение блистеров по диаметрам. При одновременном облучении ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> плотность блистеров максимальна (см. таблицу). Характерно также наличие отверстий в крышках блистеров при одновременной имплантации ионов D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup>. Анализ экспериментальных результатов свидетельствует о том, что хотя сам по себе эффект повреждения поверхности ионами дейтерия мал, имплантация ионов дейтерия до облучения ионами He<sup>+</sup> или одновременно с ионами He<sup>+</sup> существенно влияет на кинетику гелиевого блистеринга. Особенно наглядно этот синергический эффект проявляется при сравнении топографии поверхности нержавеющей стали, облученной при температуре, характерной для возникновения флекинга (при бомбардировке только ионами гелия).

Рис. 4 иллюстрирует топографию поверхности мишеней из нержавеющей стали после облучения при 200 °С ионами He<sup>+</sup> (а), одновременно ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (б), последовательно ионами D<sup>+</sup>

Рис. 3. Распределение блистеров по диаметрам при облучении последовательно ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (— — —); одновременно ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (...) и только ионами He<sup>+</sup> (—)



и He<sup>+</sup> (в), или наоборот, ионами He<sup>+</sup>, а затем ионами D<sup>+</sup> (г). На рис. 4, а воспроизведена типичная картина пораженной гелиевым флекингом нержавеющей стали при  $T_{обл} = 0,1T_{пл}$ . Оцененная по микрофотографии скорость эрозии составляет 0,65 атом/ион. Одновременная имплантация ионов D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> (см. рис. 4, б) резко увеличивает эрозию поверхности. В этом случае наблюдается флекинг трех слоев, коэффициент эрозии возрастает до 2,2 атом/ион. Сравнение рис. 4, б, в и г указывает на существенную роль синергизма: суммарный эффект от поочередного внедрения отдельных компонентов резко отличается от наблюдаемого при одновременном внедрении ионов дейтерия и гелия. Как видно из рис. 4, в и г, последовательность облучения ионами D<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> значительно влияет не только на степень повреждения, но и на характер эрозии поверхности нержавеющей стали. Если сначала имплантировать ионы D<sup>+</sup>, а затем ионы He<sup>+</sup> (см. рис. 4, в), то на поверхности обнаруживаются блистеры двух поколений, характеризующиеся плотностью  $10^6 \text{ см}^{-2}$  и средним диаметром 3,3 мкм, причем скорость эрозии существенно меньше, чем при гелиевом блистеринге. Как и в аналогичном эксперименте при 500 °С (см. рис. 2, г), предварительное внедрение ионов дейтерия в мишень уменьшает интенсивность радиационного повреждения при последующей бомбардировке поверхности ионами гелия. Таким образом, максимальная эрозия поверхности наблюдается при одновременном облучении нержавеющей стали ионами дейтерия и гелия.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что при имитации процесса взаимодействия плазмы с первой стенкой термоядерного реактора необходимо учитывать эффекты синергизма. В частности, закономерности блистеринга при одновременном воздействии ионов D<sup>+</sup>, T<sup>+</sup> и He<sup>+</sup> будут существенно отличаться от закономерностей гелиевого блистеринга.

Некоторые особенности блистеринга и флекинга при совместном (одновременном или последова-

Влияние условий имплантации на плотность и размер блистеров в стали 0X16N15M3B

Параметр	Имплантируемые ионы			
	He <sup>+</sup>	D <sup>+</sup>	1) D <sup>+</sup> ; 2) He <sup>+</sup>	D <sup>+</sup> + He <sup>+</sup>
$\rho, \text{ см}^{-2}$	$6 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$	$10^7$	$2,25 \cdot 10^7$
$d, \text{ мкм}$	2,65	0,5	1,4	1,65

тельном) облучении металла ионами  $D^+$  и  $He^+$ , вероятно, могут объяснить наблюдаемые закономерности.

Основную роль в процессах блистеринга и флешинга играет внедренный гелий. Дейтерий вызывает только сопутствующие эффекты, хотя его доза была в 6 раз больше. Это обусловлено худшей растворимостью гелия в металлах. Влияние дейтерия сводится в основном к двум факторам:

изменению упругих свойств материала, по-видимому, из-за дополнительного образования пузырьков (наполненных дейтерием или дейтерием и гелием), что приводит к уменьшению жесткости крышек блистеров;

увеличению напряжений в поверхностном слое с внедренными ионами  $He^+$  и  $D^+$  как в результате повышения давления в гелиевых пузырьках при попадании в них дейтерия, так и в результате возрастания количества таких пузырьков.

При предварительном облучении ионами  $D^+$  зарождение пузырьков  $D^+$  затруднено из-за весьма слабой связи атомов дейтерия с вакансиями.

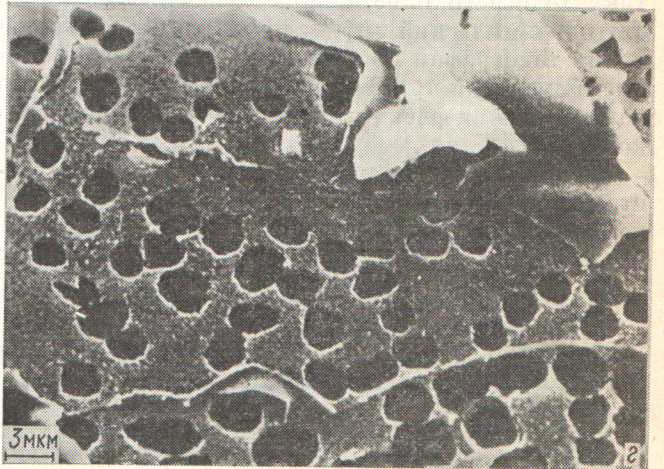
Если же облучение ионами  $D^+$  проводится одновременно с облучением ионами  $He^+$  или после него, то дейтерий попадает в пузырьки гелия и способствует их росту. Кроме того, при облучении дейтерием создаются вакансии, способствующие зарождению большего числа пузырьков. Последнее, по-видимому, сильнее проявляется при одновременном облучении.

Изменение упругих свойств материала и уменьшение жесткости крышек приводит к уменьшению размеров блистеров в случае облучения при  $500^\circ C$ . Образование блистеров происходит вследствие возникновения напряжения в крышке блистеров [7]

при параметре  $\alpha = Sd^2 / KN = 1$ , где  $S = \int_0^t \sigma_{rr} dx$  —

интегральное боковое напряжение в крышке;  $d$  — диаметр блистера;  $N$  — жесткость крышки;  $K$  — коэффициент, определяемый граничными условиями.

Для сплошной упруго деформированной крышки  $N = Et^3 / (1 - \nu^2)$ , где  $E$  — модуль Юнга;  $\nu$  —



Р и с. 4. Микроструктура поверхности нержавеющей стали 0Х16Н15М3Б после облучения при  $200^\circ C$

коэффициент Пуассона;  $t$  — толщина крышки. Если же часть крышки блистера претерпевает пластическую деформацию, то  $N$  уменьшается [8]. Уменьшение  $N$  происходит и в том случае, если значительная часть крышки занята пузырьками. Из равенства  $\alpha = 1$ , реализуемого в момент образования блистеров, следует [4], что при уменьшении  $N$  будет уменьшаться размер блистеров, как это и наблюдалось при  $T_{\text{обл}} = 500^\circ\text{C}$  (см. рис. 2, з). Об увеличении числа пузырьков и изменении структуры крышек блистеров при внедрении ионов  $D^+$  свидетельствует наличие пор на крышках блистеров, образовавшихся в результате одновременного облучения ионами  $D^+$  и  $He^+$  при  $T_{\text{обл}} = 500^\circ\text{C}$ .

Уменьшение жесткости крышек приводит также к тому, что флекинг, наблюдаемый при облучении ионами  $He^+$ , сменяется блистерингом в случае предварительного облучения ионами  $D^+$ . По-видимому, это происходит в результате того, что под действием бокового напряжения менее жесткая крышка пластически деформируется раньше, чем давление газа вызовет отрыв этой крышки и флекинг [4], как это наблюдалось на мишенях, предварительно облученных ионами  $D^+$  при  $200^\circ\text{C}$ . Если на образцах, последовательно облученных

ионами  $He^+$  и  $D^+$ , наблюдались блистеры второго поколения (первый слой отшелушен в результате чисто гелиевого облучения), то одновременное облучение ионами  $D^+$  и  $He^+$  при  $200^\circ\text{C}$  приводит к флекингу трех слоев. Вероятно, это вызвано преобладанием влияния возросшего давления в газовых пузырьках под влиянием изменения жесткости крышек блистеров. Возросшее давление в газовых пузырьках только ускоряет флекинг (три слоя вместо одного), но не меняет характера эрозии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Das S., Kaminsky M. Rad. Eff. on Solid Surfaces, Adv. in Chem., 1976, v. 158, p. 112.
2. Behrish R. e.a. In: Proc. of 9-th Symp. on Fusion Technol. Garmisch-Partenkirchen, 1976, p. 531.
3. Gusev V. e.a. «Rad. Eff.», 1979, v. 40, p. 37.
4. Гусев В. М. и др. Препринт ИАЭ-3133. М., 1978.
5. Das S. e.a. Paper Presented at the Intern. Conf. on Low Energy Ion Beams, Salford, 1977.
6. Гусев В. М. и др. Приборы и техника эксперимента, 1969, т. 4, с. 19.
7. Risch M., Roth J., Scherzer B.M.U. In: Proc. Intern. Symp. on Plasma Wall Interaction. N.Y., Pergamon Press, 1977, p. 391.
8. Соколовский Е. В. Теория пластичности. М., «Наука», 1969.

Поступила в Редакцию 27.03.80

УДК 621.039.512.4

## Нестационарный перенос нейтронов в среде с сильными неоднородностями

ЖЕМЕРЕВ А. В., КАЗАРНОВСКИЙ М. В., МЕДВЕДЕВ Ю. А., МЕТЕЛКИН Е. В.

Нестационарный перенос нейтронов в однородных средах изучен достаточно подробно [1—3]. Аналогичный процесс в слабонеоднородных средах исследован в работах [4, 5]. Однако при решении различных прикладных проблем часто необходимо рассчитывать нестационарное нейтронное распределение в средах, состоящих из нескольких зон с резко различающимися свойствами в отношении переноса нейтронов. Такие задачи возникают, например, при расчетах разрешающей способности нейтронного спектрометра по времени замедления в свинце с источником, охлаждаемым водой, и в некоторых других случаях.

Аналитическое решение таких задач связано с большими математическими трудностями даже при использовании существенно упрощающих предположений (например, возрастного приближения [6, 7]). Однако сильное различие свойств соприкасающихся зон, а именно их замедляющих способностей, как раз может служить основой для разработки единого приближенного метода решения довольно широкого круга подобных задач. В настоящей работе излагается такой метод. Кроме того, в качестве иллюстрации рассматривается точное аналитическое решение в возраст-

ном приближении модельной задачи о замедлении нейтронов от импульсного точечного источника в системе из двух непоглощающих зон с сильно различающимися свойствами, имеющими плоскую границу раздела, в предположении, что в каждой зоне длина свободного пробега нейтронов обратно пропорциональна их скорости ( $l \sim 1/v$ ).

При сильном различии замедляющих свойств соприкасающихся зон эволюция нейтронного распределения в одной из зон протекает много медленнее, чем в остальных (для краткости такую зону будем называть М-зоной, а остальные Б-зонами). Такая ситуация реализуется, например, если плотность вещества в М-зоне очень мала или вещество в ней имеет большие значения массового числа. Тогда поток нейтронов из М-зоны в Б-зону медленно изменяется со временем, и его в первом приближении можно считать квазистационарным. Соответственно и распределение таких нейтронов в Б-зонах будет квазистационарным. Это означает, что производная по времени  $t$  от этого распределения пренебрежимо мала по сравнению с другими членами уравнения переноса в Б-зонах. Поэтому его можно искать методами решения стационарных задач, рассматривая  $t$  как параметр. Таким обра-