

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lavreniuk P., Chemyshev V., Egorenkov P. e.a. The Russian RERTR program works status. — In: 22 Intern. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). Hungary, Budapest, October 4—8, 1999. Vienna: IAEA, INIS, 2004, Ref. 35015902.
2. Егоренков П.М., Насонов В.А., Рязанцев Е.П., Талиев А.В. Работы в РНЦ «Курчатовский институт» по программе снижения обогащения топлива в исследовательских реакторах: Препринт ИАЭ-6590/4, 2009.
3. Насонов В.А. Создание расчетных методов обоснования нейтронно-физических параметров ИР с ТВС типа ИРТ-М. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. Вып. 23. Реакторные установки с ВВЭР, 2008, с. 89—97.
4. Талиев А.В. Модернизированная программа ASTRA для расчета тепловых режимов ТВС исследовательских реакторов с трубчатыми коаксиальными твэлами: Препринт ИАЭ-6405/5, 2006.
5. Ryazantsev E.P., Egorenkov P.M., Nasonov V.A. e.a. Testing of the IRT 4M-type FA with LEU  $\text{UO}_2$  fuel in the WWR-CM reactor. — In: 23 Intern. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). USA, Las Vegas, October 1—6, 2000. 1986—2003. Vienna: IAEA, INIS, 2004, Ref. 35015861.
6. Chernyshov V.M., Ryazantsev E.P., Egorenkov P.M. e.a. Results of IRT-4M-type FA's testing in the WWR-CM reactor (Tashkent). — In: 25 Intern. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). Argentina, San Carlos de Bariloche, November 3—8 2002. 1986—2003. Vienna: IAEA, INIS, 2004, Ref. 35015771.
7. Vatulina A., Stetsky Y., Dobrikova I. e.a. Preparation for in-pile tests of a LEU new type fuel element. — In: 23 Intern. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). USA, Las Vegas, Nevada, October 1—6, 2000. 1986—2003. Vienna: IAEA, INIS, 2004, Ref. 35015860.
8. Izhutov F.L., Starkov V.A., Pimenov V.V. e.a. The status of testing LEU U—Mo full-size IRT type fuel elements in the MIR reactor. — In: Report on 30 Intern. Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR). USA, Washington, October 5—9, 2008. 1986—2003. Vienna: IAEA, 2009.

Поступила в Редакцию 29.01.10

УДК 539.074.3

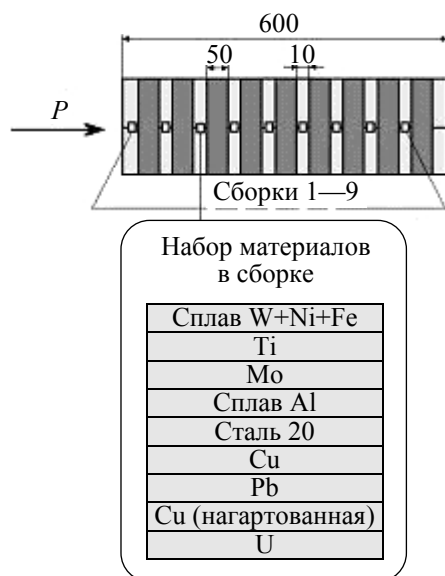
## НАВЕДЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗВИТИИ МЕЖЪЯДЕРНОГО КАСКАДА, ИНИЦИИРОВАННОГО ПРОТОНАМИ ЭНЕРГИЕЙ 50 ГэВ

Бородин В.Е., Зятьков О.В., Крупный Г.И., Обрящикова Л.П., Пелешко В.Н., Расцветалов Я.Н., Федотов Ю.С. (ГНЦ ИФВЭ, Протвино, Московская обл.)

В период между сеансами работы ускорителей протонов высоких энергий основной вклад во внешнее облучение персонала вносит  $\gamma$ -излучение наведенной радиоактивности. Для прогнозирования радиационной обстановки необходимо иметь экспериментальные данные о качественном и количественном составе радиоактивных ядер в различных материалах, облученных пучком протонов. Наличие таких данных позволит оперативно решать как задачи обеспечения радиационной безопасности персонала на ускорителях, так и оптимизации выбора материалов для проектируемых установок на ускорителе в целях минимизации наведенной радиоактивности. При постановке такого эксперимента следует учитывать, что вдоль направления прохождения пучка с увеличением толщины исследуемого материала развивается

каскад вторичных частиц и, следовательно, изменяется компонентный состав, пространственное и энергетическое распределение частиц, ответственных за наведенную радиоактивность материала [1]. В качестве среды для формирования межъядерного каскада под действием высокоэнергетических протонов был выбран свинец.

Установка для моделирования условий развития межъядерного каскада в веществе под действием высокоэнергетических протонов показана на рис. 1. На свинцовом основании толщиной 100, длиной 600 мм установлено девять свинцовых блоков толщиной 50 мм, размером 100×200 мм с воздушными промежутками между ними размером 10 мм. Ось пучка протонов параллельна основанию и проходит на 10 мм выше его плоскости. Вдоль этого направления в



Р и с. 1. Схема установки по облучению сборок с образцами конструкционных материалов (вид сверху)

промежутках между блоками размещают образцы конструкционных материалов. Суммарная толщина свинца вдоль оси пучка 450 мм. К проведению эксперимента подготовлено девять сборок, каждая составлена из девяти образцов в виде дисков диаметром 20, толщиной 1 мм следующих конструкционных материалов — сплава вольфрама с никелем и железом, титана, молибдена, алюминиевого сплава, стали 20, меди, свинца, меди нагартованной и металлического урана. Химический состав облучаемых материалов приведен в табл. 1. Номер сборки соответствовал номеру экспериментального места (зазора) в установке. Сборка 1 находилась на лицевой стороне первого свинцового блока. Перед ней помещали мониторинговую алюминиевую фольгу толщиной 200 мкм, диаметром 20 мм.

Поскольку в конструкционные материалы включен уран, необходимо было знать нуклидный состав и радиоактивность образцов до облучения. Активность  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  до облучения определяли на полупроводниковом гамма-спектрометре с кристаллом из особо чистого германия [2]. В полученном амплитудном спектре идентифицировали линию 186 кэВ, характерную для  $^{235}\text{U}$ , а также 1001 кэВ, принадлежащую  $^{234}\text{Pa}$ . Этот нуклид с периодом полураспада 6,7 ч переходит в результате  $\beta^-$ -распада в  $^{234}\text{U}$ . Удельная активность  $A_m$  всех образцов одинакова в пределах погрешностей измерений  $\pm 5\%$ , поэтому в табл. 2 приведены данные для одного образца. На основании этих данных доля ядер  $^{235}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  в образцах до облучения составляла 0,13 и

Таблица 1. Химический состав облучаемых материалов

| Материал                  | Содержание элементов, %                                                                                                                                                                                                                                           |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Уран                      | U 99,83582, B 0,00002, C 0,055, P 0,01, Si 0,01, Cr 0,005, Mn 0,001, Fe 0,02, Ni 0,01, Cu 0,002, Mg 0,001, W 0,005, V 0,005, Mo 0,005, Al 0,005, K 0,005, Na 0,003, Pb 0,001, Ca 0,01, Zr 0,01, Li 0,0001, Ag 0,0001, Be 0,0001, Co 0,0003, Sn 0,0005, Cd 0,00006 |
| Сплав W+Ni+Fe             | W 89,9, Fe 3,1, Ni 7                                                                                                                                                                                                                                              |
| Свинец                    | Pb 99,985, Ag 0,001, Fe 0,001, Cu 0,001, As 0,0005, Zn 0,001, Sb 0,001, Sn 0,0005, Bi 0,006, Na+Mg+Ca 0,002                                                                                                                                                       |
| Молибден                  | Mo 96,942, C 0,1, P 0,01, S 0,01, Ni 0,1, Cu 0,01, As 0,01, Zn 0,006, Sn 0,003, Sb 0,003, Bi 0,003, Pb 0,003, W 0,5, SiO <sub>2</sub> 1,4, кислород и влага 0,9                                                                                                   |
| Сталь 20                  | Fe 98,47, C 0,2, Mn 0,4, P 0,04, S 0,04, Si 0,2, Cr 0,2, Ni 0,2, Cu 0,2, As 0,05                                                                                                                                                                                  |
| Титан                     | Ti 99,67, C 0,02, N 0,02, O 0,04, Cl 0,08, Si 0,02, Fe 0,11, Ni 0,04                                                                                                                                                                                              |
| Сплав Al                  | Al 97,8, Mg 0,5, Si 0,3, Cr 0,1, Mn 0,2, Fe 0,7, Cu 0,2, Zn 0,2                                                                                                                                                                                                   |
| Медь и медь нагартованная | Cu 99,92, O 0,05, S 0,004, Fe 0,005, Ni 0,002, As 0,002, Sn 0,002, Sb 0,002, Zn 0,004, Pb 0,005, Bi 0,001, Ag 0,003                                                                                                                                               |

0,052% соответственно. В природном уране эти доли равны 0,14 и 0,057% соответственно [3]. Собственные  $\gamma$ -линии  $^{238}\text{U}$  энергией 49,55 и 113,5 кэВ, вносящие незначительный вклад в суммарную активность, не определяли.

Таблица 2. Исходные данные для образца урана массой 5,637 г до облучения

| Параметр             | $^{235}\text{U}$     | $^{234}\text{U}$     |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| $A$ , Бк             | 556                  | 65 619               |
| $A_m$ , Бк/г         | 99                   | 11 600               |
| Число ядер в образце | $1,78 \cdot 10^{19}$ | $7,33 \cdot 10^{17}$ |

До начала облучения образцов настройка устройств быстрого вывода пучка ускоренных до 50 ГэВ протонов была выполнена таким образом, чтобы он попал в центр сборки, т.е. проходил на высоте 10 мм от поверхности свинцовой платформы. Диаметр выводимого пучка 1 мм. Наведение пучка контролировали с помо-

щью телекамеры по свечению сцинтиллятора размером 10×10×10 мм, установленного в том месте, где затем размещали сборку 1. Перед облучением образцов сцинтиллятор удаляли. Для определения числа выведенных на установку протонов по реакции  $^{27}\text{Al}(p, \text{spall})^7\text{Be}$  использовали алюминиевую фольгу.

Образцы облучали в течение 1 мин протонами выведенного пучка ускорительного комплекса У-70 ГНЦ ИФВЭ. В результате расчета алюминиевой фольги на полупроводниковом спектрометре число протонов, прошедших через установку, составило  $1,4 \cdot 10^{13}$ . Погрешность

определения активности  $^7\text{Be}$  составляла 6%, погрешность сечения  $\sigma = 8$  мб в реакции  $^{27}\text{Al}(p, \text{spall})^7\text{Be}$  — 10%. Для определения активности нуклидов в образцах также измеряли на полупроводниковом спектрометре. Вследствие достаточно длительного набора статистики (1—1,5 ч) и большого числа образцов (~80) для определения нуклидного состава была взята только сборка с максимальной наведенной радиоактивностью — сборка 3. Удельная активность долгоживущих радионуклидов (период полураспада более 1 сут) части исследованных образцов сборки 3 на конец облучения приведена в табл. 3.

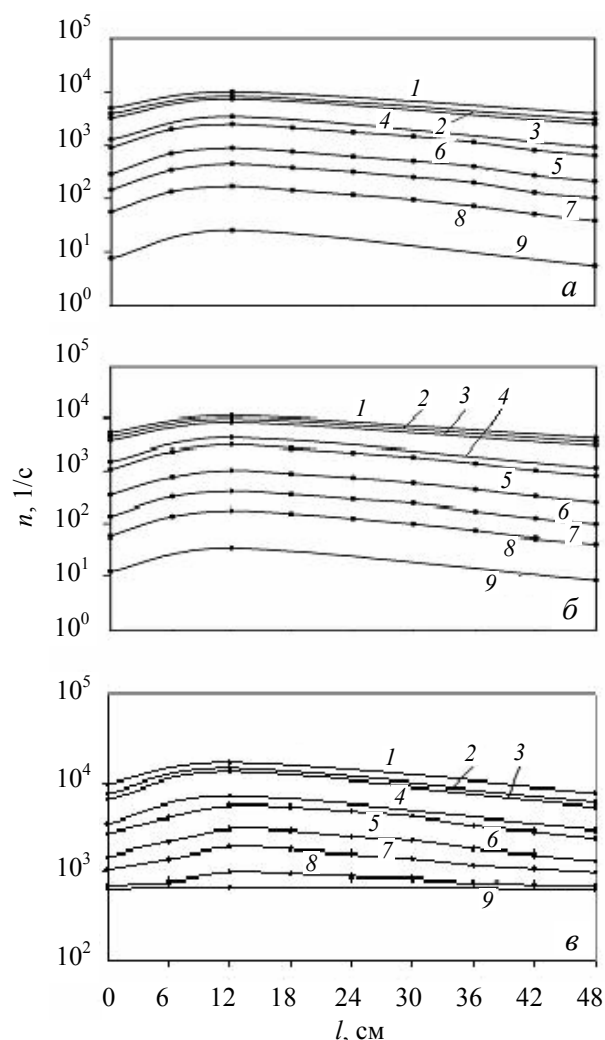
**Пространственно-временные зависимости наведенной активности образцов.** Для относительных измерений наведенной активности образцов был использован сцинтилляционный радиометр (NaI(Tl)-кристалл) из состава прибора РГГ-01Т. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов оценивали с помощью набора образцовых источников ОСГИ. Результаты измерений эффективности регистрации приведены в табл. 4.

Таблица 4. Эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов

| Нуклид            | Эффективность регистрации, % |
|-------------------|------------------------------|
| $^{22}\text{Na}$  | 4,8                          |
| $^{60}\text{Co}$  | 4,0                          |
| $^{133}\text{Ba}$ | 4,9                          |
| $^{137}\text{Cs}$ | 5,2                          |
| $^{152}\text{Eu}$ | 4,4                          |

Градуировочные источники и образцы с наведенной активностью размещали в центре кристалла на расстоянии 20 мм от его поверхности и регистрировали скорость счета. От скорости счета к флюенсу  $\gamma$ -квантов в первом приближе-

нии (без учета различий спектров образцовых источников и наведенной активности в образцах) переходили с помощью средней эффективности регистрации  $\gamma$ -квантов (4,7%). Дозиметрическая привязка на том же расстоянии (20 мм) с помощью прибора ДРБП-03 дает усредненный по всем образцам коэффициент перехода от скорости счета к мощности дозы  $1,3 \cdot 10^{-3}$  (мкЗв/ч)/имп.·с<sup>-1</sup>. Продольная зависимость (вдоль оси установки) скорости счета от толщины мишени  $l$  для некоторых образцов показана на рис. 2. Особенностью представленных данных является наличие максимума наведенной радиоактивности всех образцов на толщине 10 см свинца.

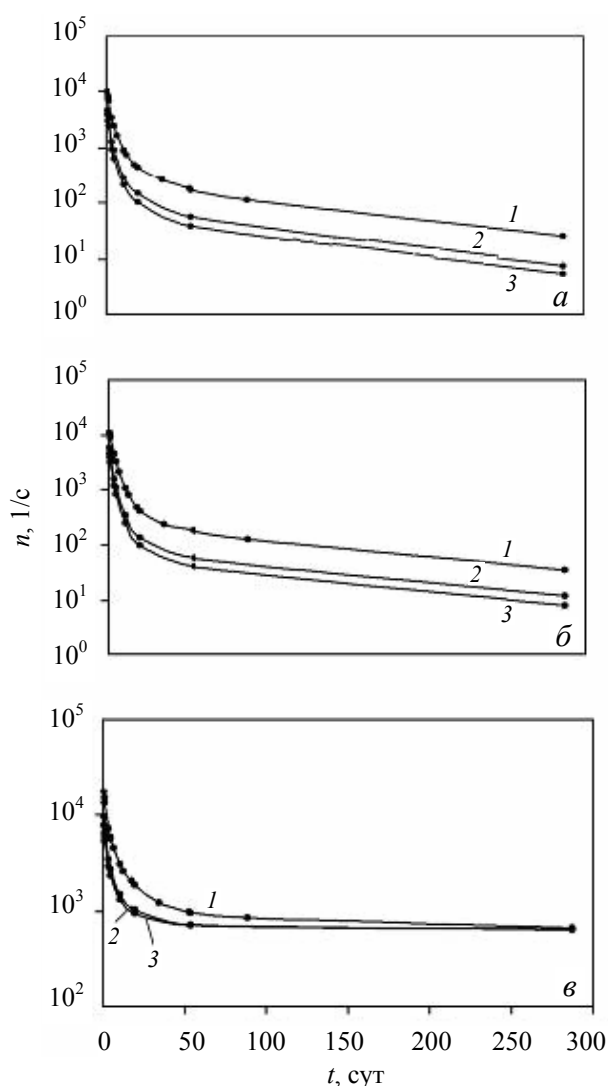


Р и с. 2. Продольное распределение скорости счета импульсов в образцах вольфрамоникелевого железного сплава (а), молибдена (б), урана (в) при выдержке 0,65 (1), 1,08 (2), 1,33 (3), 3,52 (4), 3,71 (5), 10,75 (6), 18,63 (7), 53,67 (8), 287,5 сут (9)

Т а б л и ц а 3. Радионуклидный состав образцов после облучения

| Радионуклид                                     | Период полураспада, сут | Энергия $\gamma$ -кванта, кэВ | Выход $\gamma$ -квантов, отн. ед. | Удельная активность, Бк/г | Погрешность, $\pm\%$ |
|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------|
| Сплав вольфрама, никеля и железа, $m = 4,489$ г |                         |                               |                                   |                           |                      |
| <sup>46</sup> Sc                                | 83,83                   | 889,2                         | 1                                 | 9,4                       | 11                   |
| <sup>54</sup> Mn                                | 312,5                   | 834,8                         | 1                                 | 6,2                       | 10                   |
| <sup>59</sup> Fe                                | 44,529                  | 1099                          | 0,561                             | 14,3                      | 6                    |
| <sup>56</sup> Co                                | 78,76                   | 846,8                         | 0,999                             | 10,5                      | 12                   |
| <sup>58</sup> Co                                | 70,8                    | 810,8                         | 0,994                             | 60                        | 5                    |
| <sup>88</sup> Y                                 | 106,64                  | 898                           | 0,934                             | 6,5                       | 11                   |
| <sup>88</sup> Zr                                | 83,4                    | 392,9                         | 1                                 | 13                        | 7                    |
| <sup>95m</sup> Tc                               | 61                      | 204,1                         | 0,632                             | 23,6                      | 9                    |
| <sup>121</sup> Te                               | 17                      | 573,1                         | 0,803                             | 103,4                     | 20                   |
| <sup>146</sup> Gd                               | 48,3                    | 633,2                         | 0,48                              | 90,7                      | 5                    |
| <sup>169</sup> Yb                               | 32,01                   | 198                           | 0,359                             | 272,9                     | 5                    |
| <sup>173</sup> Lu                               | 500,05                  | 272                           | 0,13                              | 44,3                      | 9                    |
| <sup>175</sup> Hf                               | 70                      | 343,4                         | 0,869                             | 260,9                     | 4                    |
| <sup>181</sup> Hf                               | 42,4                    | 482                           | 0,86                              | 13,6                      | 17                   |
| <sup>182</sup> Ta                               | 115                     | 1231                          | 0,116                             | 51,7                      | 13                   |
| <sup>184</sup> Re                               | 38                      | 792,1                         | 0,375                             | 36,1                      | 10                   |
| <sup>184m</sup> Re                              | 165                     | 161,3                         | 0,0664                            | 98                        | 12                   |
| Молибден, $m = 2,969$ г                         |                         |                               |                                   |                           |                      |
| <sup>48</sup> V                                 | 16,238                  | 983,5                         | 1                                 | 64                        | 9                    |
| <sup>54</sup> Mn                                | 312,5                   | 834,8                         | 1                                 | 81                        | 8                    |
| <sup>56</sup> Co                                | 78,76                   | 846,8                         | 0,999                             | 109                       | 5                    |
| <sup>58</sup> Co                                | 70,8                    | 810,8                         | 0,994                             | 119                       | 7                    |
| <sup>71</sup> As                                | 2,7                     | 174,9                         | 0,911                             | 1325                      | 6                    |
| <sup>74</sup> As                                | 17,76                   | 595,8                         | 0,592                             | 88                        | 10                   |
| <sup>75</sup> Se                                | 119,8                   | 264,7                         | 0,594                             | 61                        | 12                   |
| <sup>83</sup> Rb                                | 86,2                    | 520,3                         | 0,461                             | 191                       | 8                    |
| <sup>84</sup> Rb                                | 32,77                   | 881,5                         | 0,71                              | 63                        | 7                    |
| <sup>85</sup> Sr                                | 64,84                   | 514                           | 0,98                              | 407                       | 11                   |
| <sup>87</sup> Y                                 | 3,346                   | 484                           | 0,922                             | 8050                      | 4                    |
| <sup>88</sup> Y                                 | 106,64                  | 898                           | 0,934                             | 86                        | 5                    |
| <sup>88</sup> Zr                                | 83,4                    | 392,9                         | 1                                 | 266                       | 4                    |
| <sup>89</sup> Zr                                | 3,268                   | 909,2                         | 0,999                             | 9296                      | 4                    |
| <sup>92m</sup> Nb                               | 10,15                   | 934,5                         | 0,992                             | 946                       | 4                    |
| <sup>95m</sup> Nb                               | 3,61                    | 234,7                         | 0,259                             | 903                       | 13                   |
| <sup>95</sup> Nb                                | 35,15                   | 765,8                         | 1                                 | 428                       | 4                    |
| Уран, $m = 5,637$ г                             |                         |                               |                                   |                           |                      |
| <sup>84</sup> Rb                                | 32,77                   | 881,5                         | 0,71                              | 127                       | 8                    |
| <sup>88</sup> Y                                 | 106,6                   | 898                           | 0,934                             | 18                        | 7                    |
| <sup>95</sup> Zr                                | 63,98                   | 724,2                         | 0,445                             | 390                       | 4                    |
| <sup>95</sup> Nb                                | 35,15                   | 765,8                         | 1                                 | 612                       | 4                    |
| <sup>103</sup> Ru                               | 39,28                   | 497,1                         | 0,864                             | 577                       | 4                    |
| <sup>113</sup> Sn                               | 115,1                   | 255,1                         | 0,0185                            | 403                       | 14                   |
| <sup>124</sup> Sb                               | 60,2                    | 602,7                         | 0,958                             | 37                        | 7                    |
| <sup>126</sup> Sb                               | 12,4                    | 414,8                         | 0,857                             | 190                       | 8                    |
| <sup>140</sup> Ba                               | 12,74                   | 537,3                         | 0,244                             | 1242                      | 12                   |
| <sup>141</sup> Ce                               | 32,5                    | 145,4                         | 0,48                              | 53                        | 9                    |
| <sup>156</sup> Eu                               | 15,19                   | 811,8                         | 0,102                             | 826                       | 11                   |
| <sup>182</sup> Ta                               | 115                     | 1121                          | 0,349                             | 20                        | 12                   |
| <sup>185</sup> Os                               | 94                      | 646,1                         | 0,811                             | 14                        | 13                   |
| <sup>233</sup> Pa                               | 27                      | 312                           | 0,36                              | 160                       | 9                    |
| <sup>234</sup> U                                | $2,45 \cdot 10^5$ лет   | 1001,03                       | 0,00842                           | 11 600* и 11 405          | 5* и 5               |
| <sup>235</sup> U                                | $7,04 \cdot 10^8$ лет   | 185,7                         | 0,54                              | 99* и 96                  | 5* и 5               |

\* До облучения.



Р и с. 3. Зависимость изменения скорости счета импульсов от времени выдержки образцов вольфрамоникелевого железного сплава (а), молибдена (б), урана (в): 1, 2, 3 — третья, первая, девятая сборка соответственно

Зависимость изменения скорости счета от выдержки  $t$  (кривые распада) в образцах приведена на рис. 3. Для всех образцов наблюдается резкий спад суммарной наведенной активности в первые 30 сут и плавное уменьшение в последующее время. Наименее активными оказались образцы из алюминиевого сплава. Подробную информацию о нуклидном составе, продольной зависимости скорости счета и кривых распада других образцов можно найти в работе [5].

Представленные здесь данные показывают вариации наведенной активности различных образцов конструкционных материалов.

Полученные экспериментальные данные, кроме использования в задачах радиационной безопасности, являются одновременно реперными для верификации расчетных кодов, таких, как FLUKA, MARS, LANET и GIANT.

Принимая во внимание экспериментальные данные об изотопном составе и периоде полураспада образуемых долгоживущих радионуклидов после облучения конструкционных материалов протонным пучком, можно систематизировать радиоактивные вещества и радиоактивные отходы в целях организации их временного хранения и выдержки.

Авторы выражают благодарность Ю.В. Белецкой и А.М. Мамаеву за помощь в измерениях экспонированных образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волынчиков А.И., Гетманов В.Б., Крупный Г.И. и др.** Измерение полей вторичного излучения в стальном блоке при поглощении пучка протонов с импульсом 69 ГэВ/с: Препринт ИФВЭ 83-86, 1983.
2. **Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А.** Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ: Препринт ИФВЭ 2000-30, 2000.
3. **Бекурц К., Виртц К.** Нейтронная физика. М.: Атомиздат, 1968.
4. **Крупный Г.И., Снитко Д.В., Янович А.А.** Сечения реакций  $^{27}\text{Al}(p, \text{spall})^7\text{Be}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, 3p3n)^{22}\text{Na}$ ,  $^{27}\text{Al}(p, 3pn)^{24}\text{Na}$  в диапазоне энергии протонов 37 МэВ — 70 ГэВ. — Атомная энергия, 2000, т. 89, вып. 5, с. 418—420.
5. **Бородин В.Е., Зятыков О.В., Крупный Г.И. и др.** Наведенная радиоактивность конструкционных материалов при развитии межъядерного каскада, инициированного протонами энергией 50 ГэВ: Препринт ИФВЭ 2009-12, 2009.

Поступила в Редакцию 20.08.09