

УДК 551.510.72+551.515.3

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПО ТЕРРИТОРИИ БРЯНСКОЙ ОБЛАСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ В ВОЗДУХЕ $^{137}\text{Cs}$ , ПОДНЯТОГО ВЕТРОМ С ПОВЕРХНОСТИ ПОЧВЫ

*Махонько К.П., Бесчастнов С.П., Корсаков А.Т., Мартыненко В.П.  
(НПО «Тайфун»)*

В последние годы концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе районов, загрязненных вследствие аварии на Чернобыльской АЭС, обусловлена ветровым подъемом радиоактивной пыли с поверхности почвы [1]. Для расчета распределения его концентрации в приземной атмосфере Брянской области применялась цифровая электронная карта плотности загрязнения с шагом  $0,5 \times 0,5$  км и карта ландшафта с таким же разрешением. Карты построены по методике [2] по результатам вертолетной  $\gamma$ -спектрометрической съемки НПО «Тайфун» в 1992 г.

Цифровая карта загрязнения территории Брянской области  $^{137}\text{Cs}$  с таким высоким разрешением была получена впервые. Представление о возможностях использования данных в качестве исходных при различных расчетах дает карта накопленной дозы внешнего облучения  $^{131}\text{I}$  населения этой же области с разрешением  $0,5 \times 0,5$  км [3]. Высокая степень пространственной детализации позволила обнаружить большие колебания дозы облучения  $^{131}\text{I}$ , достигающие 2 сЗв (бэр).

Цифровая ландшафтная карта местности дала возможность использовать новые подходы при расчете загрязнения воздуха  $^{137}\text{Cs}$  вследствие его вторичной ветровой миграции при подъеме с поверхности почвы. Очевидно, что интенсивность пылеобразования зависит от типа подстилающей поверхности. При авиационной съемке различались шесть основных типов подстилающей поверхности: поле, луг, лес, болото, водная поверхность, село. При проведении вертолетной  $\gamma$ -съемки путем нажатия одной из шести кнопок пульта фиксировался тип подстилающей поверхности, который определялся визуально оператором внутри круга обзора коллимированного детектора радиусом 100—150 м. Тип подстилающей поверхности регистрировали для уменьшения разброса данных от одного измерения к другому, возникающего из-за разности коэффициентов ослабления  $\gamma$ -излучения. Возможные погрешности при этом обусловлены, например, как слабым визуальным различием старой и свежей залежи, так и тем, что пространство обзора может быть одновременно отнесено к нескольким типам подстилающей поверхности.

Задачу построения поля общих характеристик подстилающей поверхности (степень распаханности, облесенности, обводненности и т.п.) по данным, полученным вдоль параллельных маршрутов вертолета, решали в предположении об изотропности и слабой неоднородности этих характеристик ландшафта на расстоянии меньше масштаба съемки (т.е. до 1 км). Для точек, расположенных в узлах квадратной сетки размером ячейки 0,5 км, подсчитывали относительную частоту появления в процессе полета того или иного типа подстилающей поверхности, что приравнивалось к вероятности обнаружения внутри ячейки подстилающей поверхности данного типа. Таким образом, при скорости полета вертолета  $\sim 150$  км/ч ( $\sim 40$  м/с) в зависимости от расположения узла сетки относительно линии маршрута тип подстилающей поверхности определяли на основании примерно 30—40 ежесекундных наблюдений через каждые 40 м. При ширине полосы обзора около 200—300 м наблюдаемая выборка в каждом узле сетки соответствовала примерно 15—20% общей площади круга обзора.

Таким образом, взаимное многократное перекрытие зон наблюдения обеспечивало достаточную достоверность определения типа подстилающей поверхности.

Каждый тип подстилающей поверхности можно характеризовать своим коэффициентом ветрового подъема радиоактивной пыли для данных погодных условий. Однако

визуальные наблюдения показывают, что в основном пылеобразование наблюдается над пахотными участками местности. В процессе проведения сельхозработ над этими участками висит пыльная мгла, хорошо видимая с вертолета. Поэтому в первом приближении было принято, что поступление радиоактивной пыли в атмосферу вследствие ее ветрового подъема с полей играет главную роль в радиоактивном загрязнении воздуха, а ее поступлением с других участков ландшафта можно пренебречь.

На рис. 1 приведены границы территории области, обследованной в процессе вертолетной  $\gamma$ -спектрометрической съемки в 1992 г. Там же приведены значительно сглаженные изолинии  $A/A_B$  — плотности загрязнения местности  $^{137}\text{Cs}$  по отношению к плотности ее загрязнения  $A_B$  в Брянске ( $A_B = 17 \text{ кБк/м}^2 = 0,46 \text{ Ки/км}^2$ ). На этой схеме отмечены характерные населенные пункты, расположенные в районах с разной плотностью загрязнения. Видно, что наиболее высокие уровни загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  наблюдаются на западе Брянской области, у границы с Беларусью.

Найдем поле концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в приземной атмосфере на высоте 1 м над уровнем земной поверхности на территории Брянской области. Для этого сначала построим цифровую карту пространственного распределения интенсивности ветрового подъема  $Q$  в атмосферу  $^{137}\text{Cs}$ . Величину  $Q$  в точке  $(x, y)$  можно определить так,  $\text{Ки}/(\text{км}^2 \cdot \text{с})$ :

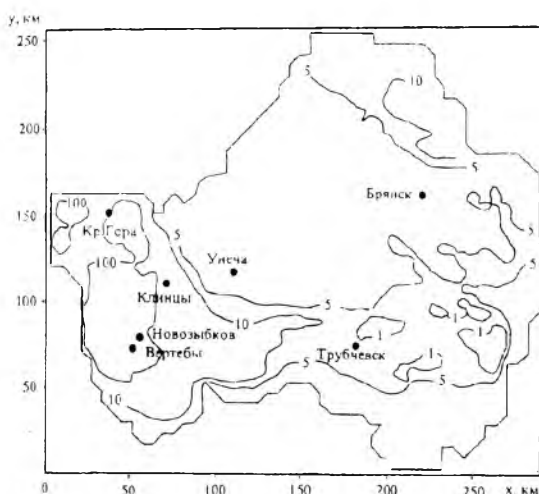
$$Q(x, y) = \alpha A(x, y) f, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности полей,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A(x, y)$  — плотность загрязнения местности в ячейке с центром в точке с координатами  $(x, y)$ ;  $f$  — доля площади ячейки  $0,5 \times 0,5 \text{ км}$ , занятая сельхозполями.

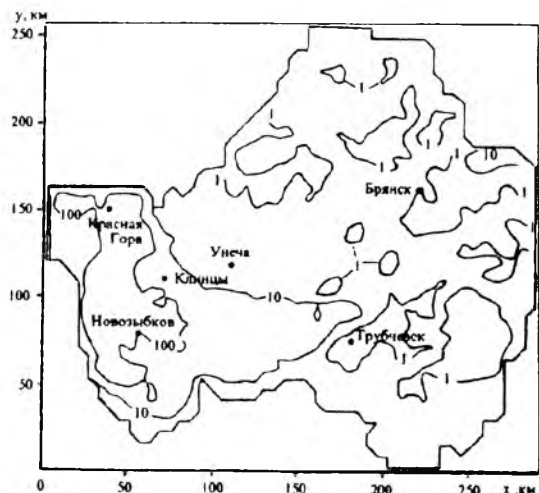
На рис. 2 приведено распределение по территории Брянской области интенсивности ветрового подъема  $^{137}\text{Cs}$  с поверхности почвы, отнесенной к той же величине для Брянска. Эти значения рассчитаны по формуле (1) в предположении постоянства коэффициента ветрового подъема пыли для сельхозполей Брянской области.

Сравнение расположения изолиний  $A/A_B$  и  $Q/Q_B$  показывает, что доля сельхозполей в разных районах области существенно изменяет расположение и интенсивность источников образования радиоактивной пыли под действием ветра.

Интенсивность ветрового подъема пыли от элементарной ячейки  $0,5 \times 0,5 \text{ км}$  примем за мощность стационарного точечного источника поступления радиоактивной пыли в атмосферу,



Р и с. 1. Распределение  $A/A_B$  — отношения плотности загрязнения почвы  $^{137}\text{Cs}$  Брянской области к той же величине в Брянске



Р и с. 2. Распределение  $Q/Q_B$  — отношения интенсивности ветрового подъема  $^{137}\text{Cs}$  с поверхности почвы Брянской области к той же величине для Брянска

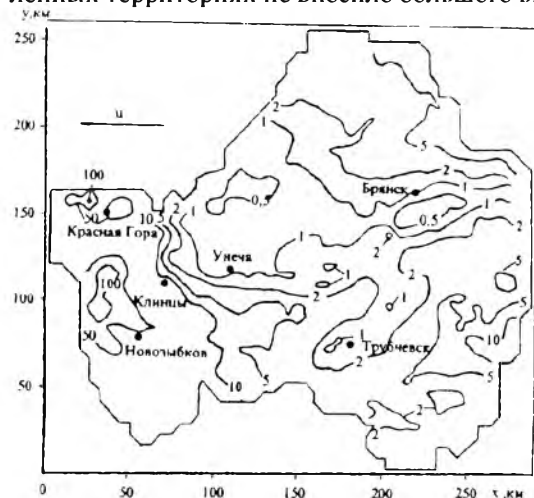
расположенного в центре ячейки. Тогда концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе в каждой точке наблюдения можно рассчитать, пользуясь полуэмпирической теорией турбулентной диффузии для описания распространения аэрозольной примеси в атмосфере, как результат суперпозиции одновременного действия всех упомянутых точечных источников на территории Брянской области. Методика расчета этих полей концентрации была описана в работе [4], математический аппарат и параметры распространения примеси в атмосфере — [5].

В работе [6] приведены результаты ежедневных измерений метеорологических параметров и концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе  $q$  в 1992—1993 гг. на окраине Новозыбкова, расположенного на западе Брянской области. В июле—сентябре 1992 г. усредненное  $q = 36,8 \cdot 10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup>, в тот же период 1993 г. —  $11,7 \cdot 10^{-5}$  Бк/м<sup>3</sup>.

Наблюдавшаяся концентрация являлась следствием адвекции радиоактивной пыли с территории большого числа элементарных ячеек  $0,5 \times 0,5$  км, в которых происходил ветровой подъем пыли, и потому характеризовала обширный район местности. Таким образом, рассчитанный по концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Новозыбкова коэффициент ветрового подъема будет являться усредненной характеристикой всего ландшафта в пределах дальности ветрового переноса этого радионуклида.

Применяя формулу (1) и указанную концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Новозыбкова, методом [4] получим коэффициент ветрового подъема с сельскохозяйственных полей:  $7,5 \cdot 10^{-12}$  с<sup>-1</sup> в 1992 г.,  $2,4 \cdot 10^{-12}$  с<sup>-1</sup> в 1993 г. Такое большое различие в значениях объясняется преобладающим состоянием подстилающей поверхности в эти годы. В июне—сентябре 1992 г. выпало 154 мм атмосферных осадков, в тот же период 1993 г. — 411 мм [6]. Чем больше осадков, тем сильнее увлажнение почвы и меньше пылеобразование на местности, следовательно, и коэффициент ветрового подъема. Средний коэффициент ветрового подъема в теплые периоды 1992—1993 гг. составил  $5 \cdot 10^{-12}$  с<sup>-1</sup>, далее именно эту величину использовали в расчетах полей концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе по всей территории Брянской области.

Вблизи границ рассматриваемой территории на формирование поля концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе влияет ветровая адвекция радиоактивной пыли, образовавшейся за пределами этой границы с наветренной от нее стороны. Поэтому учитывалось пылеобразование и за пределами Брянской области. Поскольку пылеобразование на удаленных территориях не вносило большого вклада в загрязнение воздуха на территории



Р и с. 3. Распределение  $q/q_{\text{Б}}$  — отношения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Брянской области к той же величине в Брянске при восточном ветре

самой области, можно было, не внося большой погрешности в расчеты, принять, что доля пахотных земель за пределами Брянской области примерно такая же, как и в среднем по этой области, и применять карты с меньшей детализацией. Исходя из этого, на основе карты масштабом 1:500 000 [7] за пределами области и цифровых электронных карт ландшафта и загрязнения территории самой области были рассчитаны поля концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в приземном воздухе географического района, изображенного на рис. 1.

На рис. 3 приведено распределение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в приземном воздухе Брянской области при восточном ветре ( $\varphi = 90^\circ$ ), дующем со скоростью 3 м/с

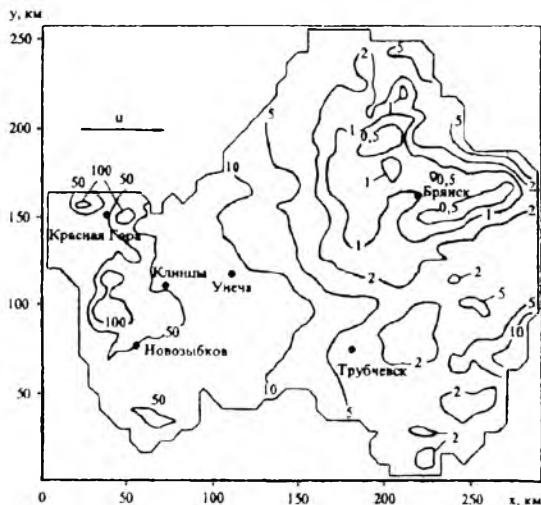
на высоте флюгера, нейтральной атмосферной устойчивости, эффективной скорости оседания радиоактивной пыли  $v_g = 1 \text{ см/с}$  и коэффициенте ветрового подъема  $5 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ . На рис. 4 приведено аналогичное распределение для ветра западного направления ( $\varphi = 270^\circ$ ). Для наглядности приводится не абсолютная концентрация, а ее отношение к концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Брянска  $q/q_B$ .

Прежде всего следует отметить, что при любом направлении ветра на западе Брянской области, в зоне высокого радиоактивного загрязнения местности, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе в 100 раз выше, чем в Брянске. При встрече с запада зона высокого по сравнению с Брянском радиоактивного загрязнения атмосферы занимает большую площадь, чем при ветре с востока. Это объясняется высоким загрязнением местности  $^{137}\text{Cs}$  западнее Унечи и далес за пределами Брянской области в Беларуси.

Восточнее Брянска также наблюдается повышенное загрязнение местности  $^{137}\text{Cs}$ . Зона загрязнения вытянута в направлении с запада на восток и распространяется до Тулы, Рязани и далее, но плотность загрязнения здесь значительно меньше, чем на западе. Поэтому при ветре с востока относительная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе меньше, чем при ветре с запада, а зона высокого по сравнению с Брянском радиоактивного загрязнения атмосферы на западе Брянской области занимает меньшую площадь. Направление изолиний концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе на рис. 3, 4 отчетливо указывает на влияние трансграничного переноса радиоактивной пыли на формирование полей его концентрации в воздушном бассейне Брянской области.

Аналогичная картина распределения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Брянской области получается и при других видах атмосферной устойчивости.

При определении концентрации в воздухе радиоактивной пыли, поднятой ветром с поверхности почвы, большой интерес представляет местная зона влияния вокруг пункта наблюдения, которая вносит вклад в радиоактивное загрязнение воздуха в этом пункте. Очевидно, что размер зоны и степень влияния на концентрацию радиоактивной пыли в пункте наблюдения должны зависеть от горизонтальных градиентов плотности радиоактивного загрязнения местности и ее способности к пылеобразованию. Сравним  $\Delta q$  — концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе на уровне 1 м, сформировавшуюся в результате ветрового подъема радиоактивной пыли только внутри зоны  $20 \times 20 \text{ км}$  вокруг пункта наблюдения, с концентрацией  $q$ , обусловленной пылеобразованием на всей территории без исключения. В расчетах, как и раньше, скорость ветра на высоте флюгера принималась равной 3 м/с, стратификация атмосферы нейтральная,  $v_g = 1 \text{ см/с}$ . В таблице приведены результаты таких расчетов для некоторых населенных пунктов Брянской области, расположенных в зонах загрязнения, резко различающихся по горизонтальной неоднородности плотности загрязнения  $^{137}\text{Cs}$ . Плотность загрязнения почвы в указанных населенных пунктах приводится по данным [8]. Видно, что вклад пылеобразования в зоне  $20 \times 20 \text{ км}$  вокруг населенного пункта в концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе этого пункта колеблется в широких пределах в зависимости от географического положения. Например, для Трубчевска, находящегося в малогра-



Р и с. 4. То же, что на рис. 3, при западном ветре

диентной зоне невысокого загрязнения местности, вокруг которой плотность загрязнения увеличивается на сравнительно большом удалении, вклад местного пылеобразования  $\Delta q/q$  в загрязнение воздуха  $^{137}\text{Cs}$  вообще отсутствует. Для Унечи, расположенной к востоку, тоже в зоне невысокого загрязнения местности  $^{137}\text{Cs}$ , но ближе к западной зоне высокого загрязнения, вклад местного пылеобразования при восточном ветре составляет 50%, при ветре с запада отсутствует. Для расположенной в зоне высокого загрязнения местности деревни Вертебы концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе в значительной мере ( $\sim 75\%$ ) обусловлена ветровым подъемом радиоактивной пыли местного происхождения, для Новозыбокова — примерно на 50%. Вклад местного пылеобразования (внутри зоны  $20 \times 20$  км) для Клинцов, расположенных у границы западной зоны высокого загрязнения, составляет 90% при восточном ветре и только 40% при западном ветре, а для находящегося у восточной границы зоны загрязнения Брянска  $\sim 40\%$  при восточном и  $\sim 70\%$  при западном ветре.

Вклад пылеобразования внутри зоны  $20 \times 20$  км вокруг населенного пункта в концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в приземном воздухе этого пункта вследствие ветрового подъема радиоактивной пыли в Брянской области при разном направлении ветра

| Населенный пункт | Плотность загрязнения, Ки/км <sup>2</sup> | Направление ветра, градус | Концентрация $^{137}\text{Cs}$         |                  |
|------------------|-------------------------------------------|---------------------------|----------------------------------------|------------------|
|                  |                                           |                           | $\Delta q, 10^{-15}$ Ки/м <sup>3</sup> | $\Delta q/q, \%$ |
| Красная Гора     | 6                                         | 90                        | 5,0                                    | 59               |
|                  |                                           | 270                       | 2,6                                    | 48               |
| Вертебы          | 27*                                       | 90                        | 8,0                                    | 73               |
|                  |                                           | 270                       | 10,0                                   | 77               |
| Новозыбоков      | 20                                        | 90                        | 3,2                                    | 53               |
|                  |                                           | 270                       | 3,5                                    | 48               |
| Клинцы           | 4                                         | 90                        | 2,0                                    | 91               |
|                  |                                           | 270                       | 3,2                                    | 39               |
| Унеча            | 0,2**                                     | 90                        | 0,1                                    | 51               |
|                  |                                           | 270                       | 0                                      | 0                |
| Трубчевск        | 0,88                                      | 90                        | 0,01                                   | 3                |
|                  |                                           | 270                       | 0                                      | 0                |
| Брянск           | 0,46                                      | 90                        | 0,009                                  | 36               |
|                  |                                           | 270                       | 0,16                                   | 67               |

\*, \*\*Интерполированное значение по четырем ближайшим населенным пунктам в радиусе  $\leq 4$  км с плотностью загрязнения 25—30 и 0,10—0,33 Ки/км<sup>2</sup> соответственно.

Райцентр Красная Гора расположен в зоне высокого загрязнения местности  $^{137}\text{Cs}$ , отличающейся большими пространственными флуктуациями плотности загрязнения. На территории самого райцентра средняя плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  составляет всего 6 Ки/км<sup>2</sup>, но вблизи есть участки местности с плотностью загрязнения 100 Ки/км<sup>2</sup> и более. Частично эти участки попадают внутрь зоны  $20 \times 20$  км вокруг Красной Горы, поэтому вклад местного пылеобразования внутри этой зоны достаточно велик и составляет 50—60%.

Таким образом, уникальная цифровая электронная карта плотности загрязнения территории Брянской области  $^{137}\text{Cs}$  с разрешением  $0,5 \times 0,5$  км, построенная на основании данных вертолетной  $\gamma$ -спектрометрической съемки НПО «Тайфун» в 1992 г., и карта типа подстилающей поверхности с таким же разрешением позволили на новом научном уровне рассчитать распределение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе Брянской области, образовавшейся за счет ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности земли. Определен коэффициент ветрового подъема  $5 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ .

Обнаружено отчетливое влияние трансграничного переноса радиоактивной пыли, поднятой ветром с поверхности почвы за пределами Брянской области, на поле концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе на территории этой области. Показано, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в воздухе западных районов области в 100 раз выше, чем в Брянске. Местоположение населенного пункта изменяет вклад местного пылеобразования в зоне  $20 \times 20$  км в общее загрязнение воздуха  $^{137}\text{Cs}$  в этом пункте в пределах 0—90%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Махонько К.П. Ветровой подъем радиоактивной пыли с подстилающей поверхности. — Атомная энергия, 1992, т. 72, вып. 5, с. 523—531.
2. Годько А.М., Бородин Р.В. Технология компьютерной обработки результатов аэрогаммасъемки. — В кн.: Методика и некоторые результаты авиационной гамма-съемки радиоактивного загрязнения территории европейской части России. С.-П.: Гидрометеиздат, 1994, с. 155—158.
3. Русаков Ю.С., Махонько К.П., Павлова Л.Н. и др. Территории, загрязненные в результате чернобыльской аварии. — В кн.: Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 1993 г. Ежегодник. Под ред. К.П. Махонько. Обнинск, изд-е НПО «Тайфун», 1994, с. 307—331.
4. Махонько К.П. Оценка изменения со временем коэффициента ветрового подъема цезия-137 с поверхности земли после чернобыльской аварии. — В кн.: Радиационные аспекты чернобыльской аварии. Под ред. Ю.А. Израэля. Т. 1. С.-П.: Гидрометеиздат, 1993, с. 289—294.
5. Махонько К.П., Бесчастнов С.П. Условия применимости градиентного метода определения коэффициента ветрового подъема радиоактивной пыли с поверхности земли. — Атомная энергия, 1996, т. 80, вып. 6, с. 461—466.
6. Брусиков Ю.С., Махонько К.П. Исследование загрязнения воздуха радиоактивной пылью на территории Брянской области. — Метеорология и гидрология, 1996, № 7, с. 5—13.
7. Израэль Ю.А., Квасникова Е.В., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Глобальное и региональное радиоактивное загрязнение цезием-137 европейской территории бывшего СССР. — Там же, 1994, № 5, с. 5—9.
8. Данные по радиоактивному загрязнению населенных пунктов РСФСР цезием-137 и стронцием-90 (на март 1990 г.). Обнинск, изд-е НПО «Тайфун», 1990.

Поступила в Редакцию 3.09.96

### Р е ф е р а т ы   с т а т е й

УДК 621.039.5

Алексеев Н.И., Андрианов Г.Я., Болобов П.А., Гуревич М.И., Ионов В.С. Анализ ядерной безопасности бассейна выдержки ВВЭР-1000 при снижении плотности теплоносителя. — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 4, с. 243—249.

Разработана трехмерная модель бассейна выдержки, позволяющая анализировать критичность хранилища ядерного топлива при различных аварийных ситуациях со снижением плотности воды. Проведено сравнение результатов расчетов и измерений на критическом стенде ИЯР РНЦ «Курчатовский ин-т». Исследован диапазон изменения плотности теплоносителя в бассейне выдержки от 0 до 1. Результаты работы позволили определить диапазон плотности теплоносителя при неуплотненном и уплотненном размещении ТВС, обеспечивающий регламентируемую подкритичность. Рис. 3, табл. 2, список лит. 11 назв.

УДК 539.125.5.173

Ионов В.С., Алексеев Н.И., Андрианов Г.Я., Крайнов Ю.А., Семенов В.Н., Хамаза В.А. Исследование нейтронно-физических характеристик поглотителей из карбида бора,

гафния и диспрозия на критических сборках из твэлов ВВЭР. — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 4, с. 250—254.

Приводятся результаты экспериментально-расчетных исследований эффективности поглощающих элементов (пэлов), выполненных из различных материалов. Результаты демонстрируют эффективность пэлов, отнесенную к поглотителю из карбида бора. Рис. 3, табл. 3, список лит. 7 назв.

УДК 621.039.54

Щеглов А.С., Проселков В.Н., Смирнов А.В., Смирнов В.П., Ананьев Ю.А., Цибуля В.А., Колосовский В.Г., Панин В.Н., Пыткин Ю.Н. Моделирование поведения твэлов ВВЭР-440 при глубоком выгорании (на примере 3-го энергоблока Кольской АЭС). — Атомная энергия, 1996, т. 81, вып. 4, с. 254—261.

Приведены результаты расчета по программе PIN-mod2 теплофизических характеристик твэлов двух ТВС, достигших глубокого выгорания урана на 3-м энергоблоке Кольской АЭС. Сравнение результатов с данными послереакторных исследований показывает удовлетворительное соответствие. Рис. 5, табл. 3, список лит. 6 назв.