

УДК 621.039:504.064.3

**В. В. Каргашев**, канд. техн. наук  
(УкрНИИЭП)

**ВЛИЯНИЕ ПРОЕКТНОЙ АВАРИИ  
С ОТРЫВОМ КРЫШКИ КОЛЛЕКТОРА ПАРОГЕНЕРАТОРА  
ПЕРВОГО КОНТУРА ЭНЕРГБЛОКА № 2 ЮЖНО-УКРАИНСКОЙ АЭС  
НА ОКРУЖАЮЩУЮ ПРИРОДНУЮ СРЕДУ И НАСЕЛЕНИЕ  
(при использовании ТВС компании «Вестингаус»)**

*Приведены результаты расчетов и обосновано радиационное воздействие на окружающую природную среду и население проектной аварии, обусловленной разрывом трубопровода первого контура энергоблока № 2 Южно-Украинской АЭС при использовании ТВС фирмы «Вестингаус». Показано, что максимально допустимые значения эквивалентных и поглощенных доз облучения в органах и тканях человека на границе и за пределами санитарно-защитной зоны, определенные в НРБУ-97 и СП АС-88, не превышаются.*

***Ключевые слова:** проектная авария, радиационное воздействие.*

**Введение**

В настоящее время в Украине активно проводятся мероприятия по диверсификации энергоносителей для обеспечения большей энергетической безопасности Украины. В частности, в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт» (ННЦ «ХФТИ») проводятся научные изыскания по адаптации тепловыделяющих сборок производства фирмы «Вестингаус» (ТВС-W) к энергоблокам АЭС Украины, что позволит демонополизировать поставки ТВС российской компанией «ТВЭЛ» [1]. На энергоблоке № 2 Южно-Украинской АЭС (ЮУАЭС) уже проводились испытания ТВС-W. Целью данной статьи является исследование воздействия на окружающую природную среду и население проектной аварии (ПА), начальной предпосылкой которой является отрыв крышки коллектора парогенератора первого контура (ПА «Течь из первого во второй контур Ду100») энергоблока № 2 ЮУАЭС при использовании ТВС фирмы «Вестингаус».

## 1. Сценарий аварии

Исходные данные по сценарию аварии предоставлены ННЦ «ХФТИ» в соответствии с ранее разработанными в рамках анализа проектных аварий аналогичных материалов для энергоблока № 2 ЮУАЭС [1]. В этой статье рассматривается наиболее консервативный вариант (максимальный выброс) — стационарная загрузка с ТВС-W (42 ТВС-W подпитки).

Среднее проектное обогащение топлива:

- 3,81%  $^{235}\text{U}$  — для ТВС типа 381VG;
- 3,47%  $^{235}\text{U}$  — для ТВС типа 347WG.

Среднее выгорание по ТВС:

- 45 100 МВт · сут/т — для ТВС типа 381VG;
- 46 290 МВт · сут/т — для ТВС типа 347WG.

Консервативно предполагается, что на начальном этапе аварии 100% активности, обусловленной спайк-эффектом, поступает в первый контур. Предполагается, что основная часть активности поступает в окружающую среду через быстродействующую редуцирующую установку сброса пара в атмосферу или предохранительный клапан парогенератора разрывной петли, для которого постулируется отказ в открытом положении. Очистка теплоносителя от радионуклидов в парогенераторе и их осаждение в первом и втором контурах не учитываются. При рассматриваемой аварии не происходит значительного роста температуры оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). Вследствие этого не постулируется разгерметизация оболочек ТВЭЛов и выход продуктов деления из газового зазора. Оценка предаварийной активности теплоносителя второго контура показала, что она пренебрежимо мала по сравнению с активностью, выброшенной во время аварии, поэтому в расчетах предаварийная активность среды второго контура не учитывалась.

При расчетах предполагается, что 79% активности в течение первых 20 минут выбрасывается на высоту 100 м, а 21% активности выбрасывается с нулевой высоты.

Значения суммарного выброса радионуклидов в окружающую среду приведены в табл. 1. Общий выброс активности рассчитан, исходя из массы теплоносителя первого контура при номинальных параметрах — 260 т.

**1. Выброс радиоактивных веществ  
при ПА «Течь из первого во второй контур Ду100»**

Изотоп	Суммарный выход активности в первый контур, Бк	Изотоп	Суммарный выход активности в первый контур, Бк
$^{131}\text{I}$	$1,90 \cdot 10^{13}$	$^{88}\text{Kr}$	$9,15 \cdot 10^{12}$
$^{132}\text{I}$	$3,07 \cdot 10^{13}$	$^{103}\text{Ru}$	$1,91 \cdot 10^7$
$^{133}\text{I}$	$1,94 \cdot 10^{13}$	$^{106}\text{Ru}$	$3,22 \cdot 10^6$
$^{134}\text{I}$	$1,86 \cdot 10^{13}$	$^{134}\text{Cs}$	$6,19 \cdot 10^{10}$
$^{135}\text{I}$	$1,64 \cdot 10^{13}$	$^{137}\text{Cs}$	$1,22 \cdot 10^{11}$
$^{133}\text{Xe}$	$1,39 \cdot 10^{13}$	$^{141}\text{Ce}$	$6,53 \cdot 10^7$
$^{135}\text{Xe}$	$8,76 \cdot 10^{12}$	$^{144}\text{Ce}$	$3,22 \cdot 10^6$
$^{135\text{m}}\text{Xe}$	$4,00 \cdot 10^{12}$	$^{140}\text{La}$	$7,85 \cdot 10^8$
$^{85}\text{Kr}$	$1,65 \cdot 10^9$	$^{90}\text{Sr}$	$3,51 \cdot 10^6$
$^{85\text{m}}\text{Kr}$	$3,46 \cdot 10^{12}$		
$^{87}\text{Kr}$	$6,71 \cdot 10^{12}$	<b>Сумма</b>	<b><math>1,50 \cdot 10^{14}</math></b>

Консервативно принималось следующее соотношение химических форм изотопов йода, выброшенных из гермообъёма:

- 91% выброшенного йода находится в молекулярной (элементной) форме;
- 5% выбрасывается в аэрозольной форме;
- 4% выбрасывается в органической форме.

**2. Модели, используемые для расчета активностей  
радионуклидов в объектах окружающей среды  
и доз облучения населения**

Для моделирования распространения примесей в атмосфере и формирования доз, обусловленных выбросами радионуклидов, использован программный комплекс PC COSYMA, разработанный в National Radiological Protection Board (Национальный комитет по радиационной защите, Великобритания). PC COSYMA (Code System for MARIA) — это пакет программ для моделирования последствий аварийных выбросов радиоактивных веществ в атмосферу.

PC COSYMA был разработан совместно Национальной комиссией по радиационной защите (Великобритания) и Forschungszentrum Karlsruhe (Германия) как часть проекта MARIA (Methods for Accidental Radiation Impact Assessment) Европейской Комиссии.

Описания программного комплекса PC COSYMA и его отдельных модулей приведены в работе [2]. Комплекс предназначен для расчета радиационного воздействия аварийных (непродолжительных) выбросов в атмосферу радиоактивных веществ.

Система позволяет оценить следующие параметры и последствия:

- объемную активность радионуклидов в приземном слое воздуха и активность, осевшую на поверхность земли в определенных точках местности;
- ожидаемые индивидуальные и коллективные дозы за выбранные периоды времени;
- количество людей, охваченных контрмерами (укрытие, эвакуация, раздача таблеток со стабильным йодом, переселение, дезактивация, ограничение использования сельхозпродукции), и площадь территории, на которой применяются контрмеры;
- количество запрещенной для употребления сельскохозяйственной продукции;
- количество летальных и нелетальных заболеваний;
- экономическую стоимость проведения контрмер и лечения.

Система может использоваться для детерминистических и вероятностных оценок. Детерминистические оценки дают возможность вычислять последствия для одной установки метеорологических условий, а вероятностные принимают во внимание вероятный разброс метеоусловий, которые могут иметь место во время аварии.

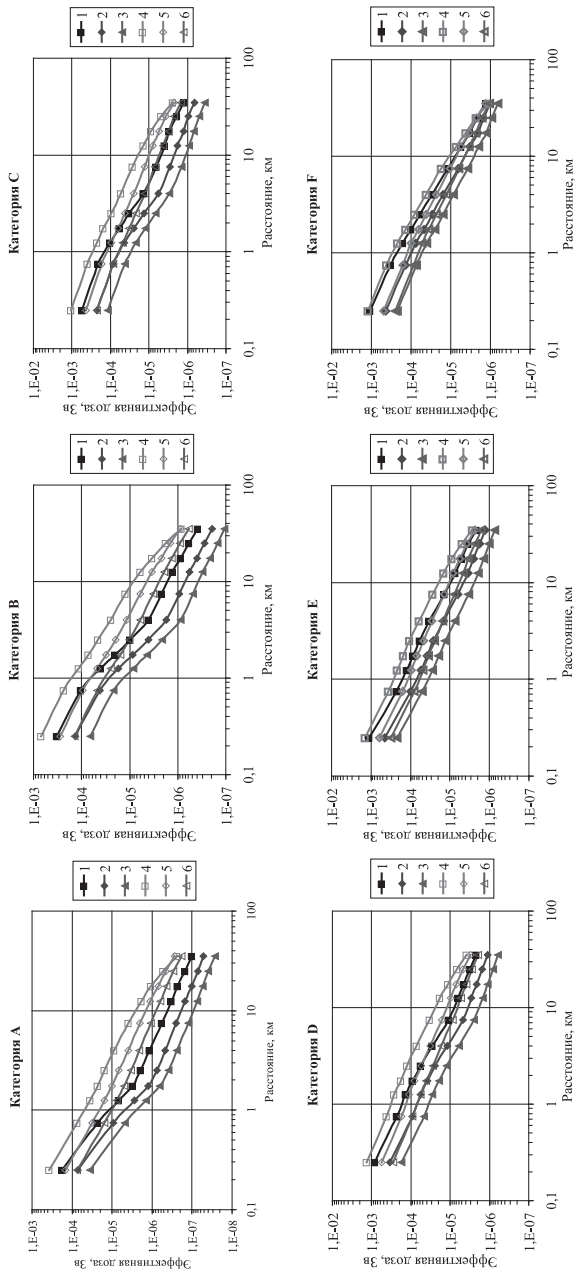
Моделирование транспорта радионуклидов в атмосфере выполняется в модуле MUSEMET. В этом модуле используется модель сегментированного гауссова пятна, которая учитывает почасовые изменения скорости и направления ветра, категории стабильности атмосферы и количества осадков, влияющих на выброшенные вещества. Модель допускает, что метеоусловия во всем интересующем регионе одинаковые. Почасовые изменения метеоусловий учитываются только при ве-

ростности оценки. При детерминистической оценке принимается, что метеоусловия (скорость и направление ветра, категория стабильности атмосферы и количество осадков) не изменяются в течение всего интересующего периода. MUSEMET использует высоту перемешивающегося слоя атмосферы, горизонтальные и вертикальные дисперсионные коэффициенты, которые являются функциями стабильности атмосферы. Дисперсионные коэффициенты в данных расчетах приняты для урбанизированных территорий.

В системе могут приниматься во внимание следующие пути облучения населения: внешнее облучение от гамма-излучения из облака выброса; внутреннее облучение от вдыхания радионуклидов при прохождении облака выброса; внешнее облучение от бета-излучения радионуклидов, осевших на кожу и одежду; внешнее облучение от гамма-излучения осевших на поверхность земли радионуклидов; внутреннее облучение от поднимаемой с поверхности земли пыли; внутреннее облучение от потребленных пищевых продуктов, загрязненных радионуклидами. Модели максимально адаптированы к реальным условиям и нормативным величинам в Украине.

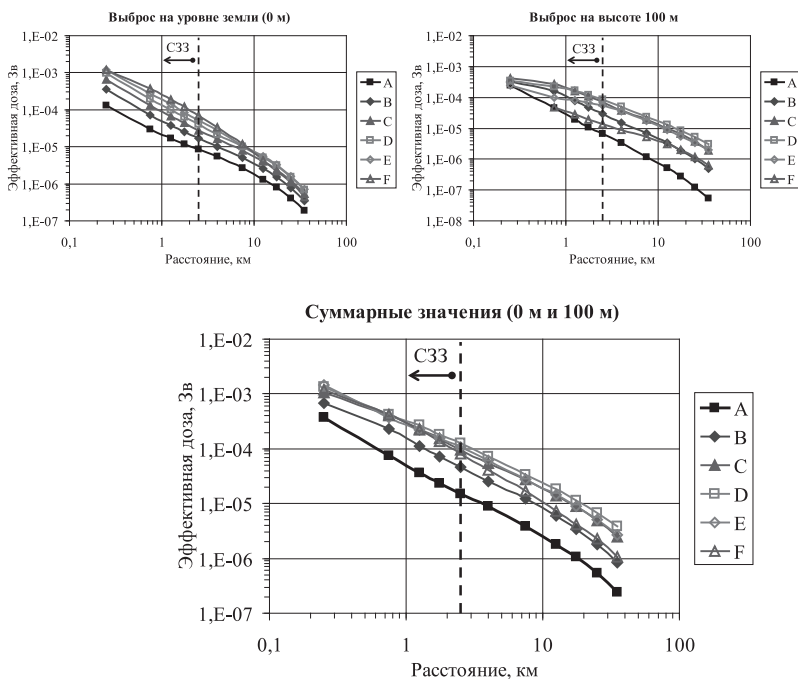
### **2.1. Выбор наиболее неблагоприятных метеоусловий**

Для обеспечения консервативности оценок необходимо провести исследования для выбора наиболее неблагоприятных метеоусловий, при которых дозы облучения населения на расстояниях от 2 500 м (санитарно-защитная зона) и дальше будут максимальными. На рис. 1 приведены зависимости максимальных ожидаемых эффективных доз облучения населения от расстояния для максимального выброса (консервативный вариант) при разных категориях стабильности атмосферы, скоростях ветра и количестве осадков. На графиках кривые соответствуют разным погодным условиям: 1 — скорость ветра 2 м/с без осадков, 2 — скорость ветра 5 м/с без осадков, 3 — скорость ветра 10 м/с без осадков, 4 — скорость ветра 2 м/с с осадками, 5 — скорость ветра 5 м/с с осадками, 6 — скорость ветра 10 м/с с осадками. Как следует из графиков, наиболее неблагоприятными являются условия при небольшом ветре (2 м/с) и наличии осадков (кривая № 4).



**Рис. 1. Зависимости ожидаемых эффективных доз облучения населения от расстояния при разных категориях стабильности атмосферы**

На рис. 2 отображены зависимости ожидаемых эффективных доз облучения населения от расстояния при разных категориях стабильности атмосферы, скорости ветра 2 м/с и наличии осадков для максимального выброса на уровне земли (21% выброшенной активности согласно со сценарием), на высоте 100 м (79% активности) и суммарные величины. Пунктирной линией обозначена граница санитарно-защитной зоны. Как следует из графиков, для выброса на уровне земли максимальные ожидаемые дозы на интересующих расстояниях ( $\geq 2\ 500$  м) наблюдаются при категории стабильности F, а для выброса на высоте 100 м — при категории стабильности D. Суммарная доза будет максимальна при категории стабильности D, так как для выброса на уровне земли разница величин доз для категорий стабильности F и D невелика, и выброс на высоте 100 м



**Рис. 2. Зависимости ожидаемых эффективных доз облучения населения от расстояния при разных категориях стабильности атмосферы, скорости ветра 2 м/с и наличии осадков**

имеет существенно большую активность (79% общей активности выброса).

Таким образом, в дальнейших расчетах последствий ПА «Гечь из первого во второй контур Ду100» консервативно предполагается, что выброс происходит при категории стабильности атмосферы D, скорости ветра 2 м/с и при наличии осадков.

### 3. Ожидаемое воздействие на окружающую природную среду и население

#### 3.1. Объемные активности радионуклидов в воздухе

На рис. 3-5 приведены зависимости от расстояния максимальных ожидаемых объемных активностей в атмосферном воздухе инертных радиоактивных газов (ИРГ), изотопов йода и аэрозолей, соответственно, при ПА «Гечь из первого во второй контур Ду100». Как видно из рисунков, максимум активности находится в пределах СЗЗ. На границе СЗЗ наибольшие активности могут наблюдаться для изотопов йода и ИРГ (от  $1,19 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>85m</sup>Kr до  $7,9 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>132</sup>I), активности аэрозолей намного меньше (от  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>141</sup>Ce до  $4,6 \cdot 10^1$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>137</sup>Cs). Ожидаемые величины достаточно высоки (выше допустимых концентраций в рабочей зоне для профессионалов (согласно НРБУ-97) на величину до 2 порядков), однако наблюдаться они будут непродолжительное время — только во время прохождения облака выброса.

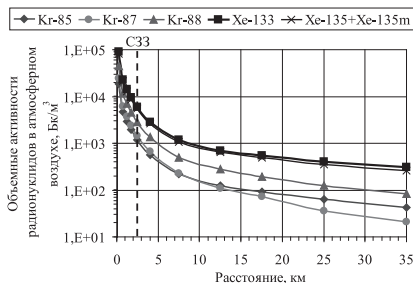


Рис. 3. Зависимости от расстояния ожидаемых объемных активностей ИРГ в атмосферном воздухе

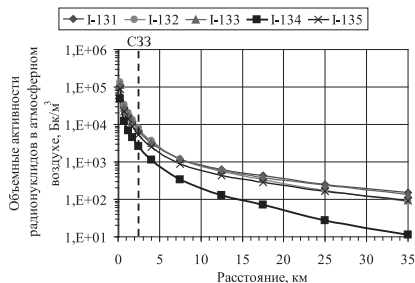


Рис. 4. Зависимости от расстояния ожидаемых объемных активностей изотопов йода в атмосферном воздухе



### 3.2. Выпадения радионуклидов на поверхность земли

На рис. 6 приведены зависимости от расстояния максимальных ожидаемых выпадений на поверхность земли изотопов йода и других аэрозолей при ПА «Течь из первого во второй контур Ду100». Как видно из рисунка, на границе СЗЗ наибольшие активности наблюдаются для изотопов йода (от  $2,7 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>134</sup>I до  $8,1 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>132</sup>I), активности аэрозолей намного меньше за счет меньшей объемной активности в атмосферном воздухе во время прохождения облака и меньшей скорости осаждения (от 1,9 Бк/м<sup>3</sup> для <sup>141</sup>Ce до  $3,6 \cdot 10^3$  Бк/м<sup>3</sup> для <sup>137</sup>Cs).

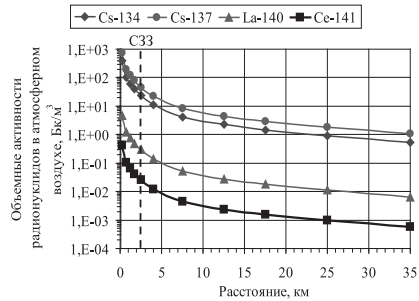


Рис. 5. Зависимости от расстояния ожидаемых объемных активностей аэрозолей в атмосферном воздухе

### 3.3. Ожидаемые дозы облучения населения

Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) [3] определяют величины доз облучения, при которых необходимо вводить экстренные или неотложные контрмеры для обеспечения безопасности для населения.

**Экстренные контрмеры.** В соответствии с НРБУ-97 термин «экстренный» подразумевает не только безусловную оправданность рассматриваемых вмешательств, но и то, что любые задержки с ре-

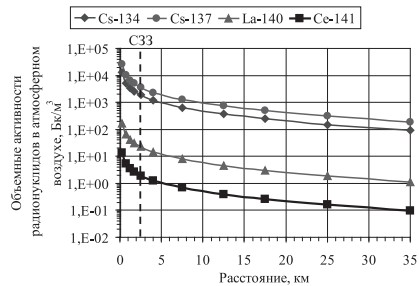
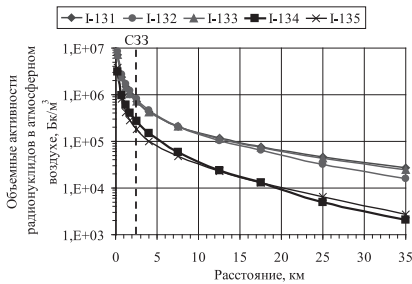


Рис. 6. Зависимости от расстояния ожидаемых выпадений изотопов йода и других аэрозолей на поверхность земли

шением и проведением этого типа контрмер создают угрозу тяжелых радиационных поражений для вовлеченного в аварию населения. Поэтому при экстренном вмешательстве необходимо гораздо более быстрое реагирование, чем то, которое приходит при «неотложных контрмерах». Как указано в НРБУ-97, уровни безусловно оправданных экстренных вмешательств построены так, чтобы предотвратить возникновение прямых клинических проявлений радиационного поражения всего тела и отдельных органов и тканей. Уровни экстренного вмешательства (табл. 2) ориентируются на величину дозы, поглощенной в течение двух суток. Нормируется поглощенная доза на все тело (костный мозг), легкие, кожу, щитовидную железу, хрусталик глаза, гонады и материнский плод. На рис. 7 приведены зависимости нормируемых показателей от расстояния для двух суток облучения после ПА «Течь из первого во второй контур Ду100».

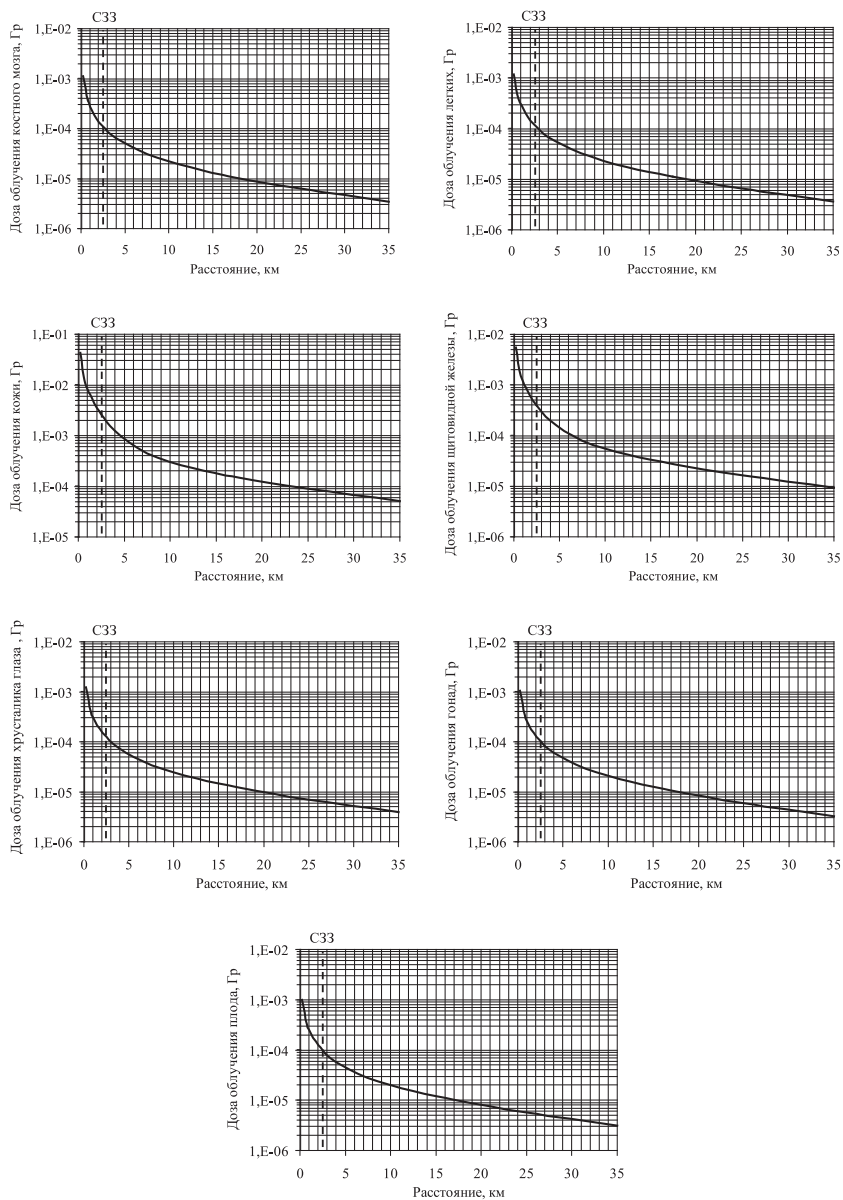
Как следует из приведенных на рис. 7 результатов расчета, ни по одному из приведенных критериев ПА «Течь из первого во второй контур Ду100» не потребует осуществления экстренных контрмер (на 2-3 порядка меньше регламентированных величин).

**Неотложные контрмеры.** В соответствии с НРБУ-97 основными и наиболее эффективными неотложными контрмерами в начальной фазе аварии являются укрытие, эвакуация, йодная профилактика и ограничение пребывания лиц из населения на открытом воздухе.

## *2. Уровни безусловно оправданного экстренного вмешательства при остром облучении согласно требованиям НРБУ-97*

Орган или ткань	Прогнозируемая поглощенная доза в органе или ткани за период менее 2-х суток, Гр
Все тело (костный мозг) <sup>1</sup>	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	2
Плод	0,1

<sup>1</sup> Как правило, применяется при внешнем облучении



**Рис. 7. Зависимости от расстояния ожидаемого облучения органов и тканей человека через 2 дня после ПА «Течь из первого во второй контур Ду100»**

Введение неотложных контрмер определено с помощью двух границ: нижней границы оправданности и верхнего уровня безусловной оправданности, см. табл. 3.

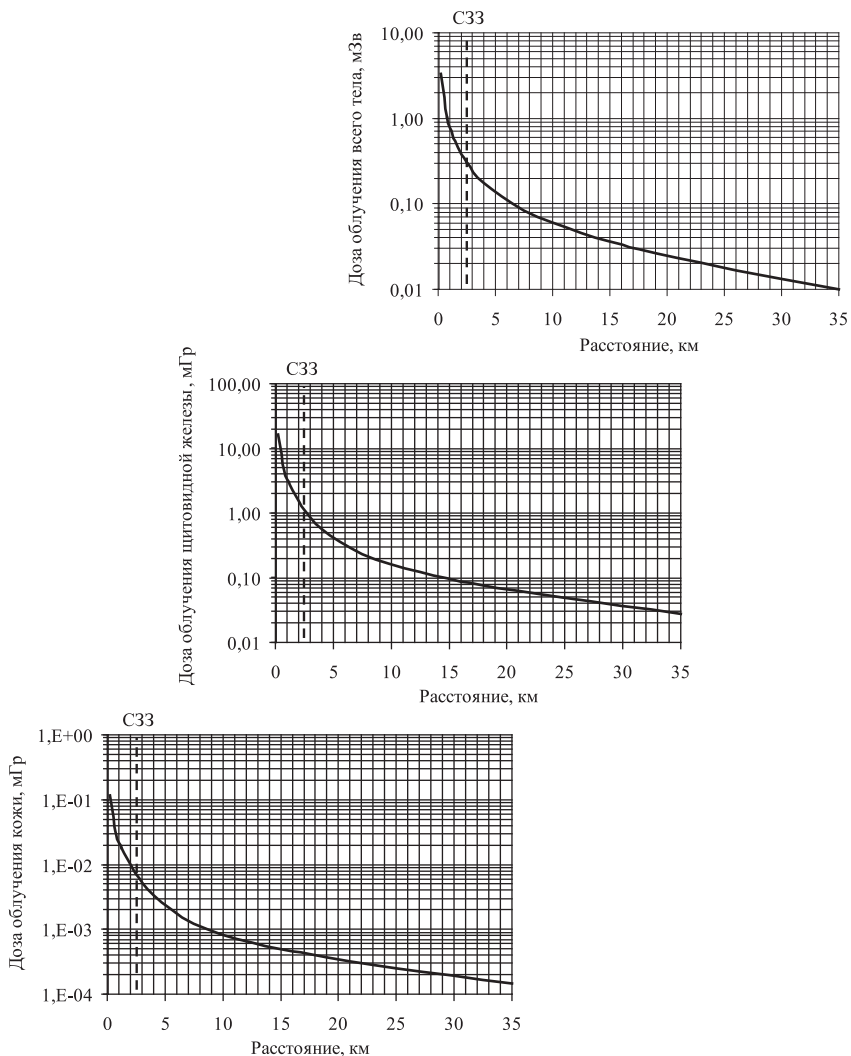
**3. Нижние границы оправданности и уровни безусловной оправданности для неотложных контрмер**

Контр- мера	Предотвращаемая доза за первые 2 недели после аварии					
	Нижние границы оправданности			Уровни безусловной оправданности		
	мЗв	мГр		мЗв	мГр	
	на все тело	на щитовидную железу	на кожу	на все тело	на щитовидную железу	на кожу
Укрытие	5	50	100	50	300	500
Эвакуация	50	300	500	500	1000	3000
Йодная профилактика						
дети	—	50 <sup>1</sup>	—	—	200 <sup>1</sup>	—
взрослые	—	200 <sup>1</sup>	—	—	500 <sup>1</sup>	—
Ограничение пребывания на открытом воздухе						
дети	1	20	50	10	100	300
взрослые	2	100	200	20	300	1000

На рис. 8 приведены зависимости нормируемых показателей от расстояния для двух недель облучения после ПА «Течь из первого во второй контур Ду100». Как видно из приведенных результатов расчета, ни по одному из упомянутых критериев ПА «Течь из первого во второй контур Ду100» не потребует осуществления неотложных контрмер (на 1-3 порядка меньше регламентированных величин).

Помимо НРБУ-97 существуют специальные санитарные правила, регулирующие деятельность атомных электростанций, — «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-88)» [4]. Согласно п. 3.14 СП АС-88 значения эквивалентных индивидуальных доз при наиболее неблагоприятных условиях

<sup>1</sup> Ожидаемая доза при внутреннем облучении радиоизотопами йода, поступающими в организм в течение первых двух недель после начала аварии.



**Рис. 8. Зависимости от расстояния ожидаемого облучения органов и тканей человека через 2 недели после ПА «Течь из первого во второй контур Ду100»**

на границе санитарно-защитной зоны и за ее пределами не должны превышать:

- 0,3 Зв/год (30 бэр/год) на щитовидную железу детей за счет ингаляции;
- 0,1 Зв/год (10 бэр/год) на все тело за счет внешнего облучения.

Согласно проведенным расчетам при ПА «Течь из первого во второй контур Ду100» дозы облучения на щитовидную железу детей составят 0,0065 Зв/год, а на все тело за счет внешнего облучения — 0,00066 Зв/год. Очевидно, что расчетные значения существенно меньше пороговых значений согласно СП АС-88.

## Выводы

В работе проведены расчеты и обосновано радиационное воздействие на население последствий проектной аварии «Течь из первого во второй контур Ду100» энергоблока № 2 ЮУ АЭС при использовании ТВС фирмы «Вестингаус». Для проведения расчетов использован программный комплекс PC COSYMA, разработанный в National Radiological Protection Board (Национальный комитет по радиационной защите, Великобритания) для аварийных ситуаций.

Все расчеты проведены для консервативных условий распространения примеси и формирования доз облучения (дозы максимальные).

Показано, что за пределами санитарно-защитной зоны максимально допустимые значения эквивалентных и поглощенных доз в отдельных органах и тканях человека, а также на все тело, определенные нормативными документами СП АС-88 и НРБУ-97, не превышаются.

1. Оценка радиационных последствий проектных аварий с протечками первого контура для энергоблока № 2 ЮУ АЭС при использовании ТВС-W : Отчет о работе : X/д № 477/4. 1. Этап 2. Окончательная редакция отчета «Оценка радиационных последствий проектных аварий с протечками первого контура для энергоблока № 2 ЮУ АЭС при использовании ТВС-W» / УкрНИИЭП. — X., 2011. — 60 с.
2. J. A. Jones, P. A. Mansfield, S. M. Haywood et al. PC COSYMA (Version 2): An accident consequence assessment package for use on a PC. — Luxem-

borg: Office for Official Publications of the European Communities, 1996. — 59 p.

3. Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97) : Министерство здравоохранения Украины. — К., 1998. — 134 с.
4. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-88) : Министерство здравоохранения СССР. — М., 1988.

**Карташов В. В.** ВПЛИВ ПРОЕКТНОЇ АВАРІЇ З ВІДРИВОМ КРИШКИ КОЛЕКТОРА ПАРОГЕНЕРАТОРА ПЕРШОГО КОНТУРУ ЕНЕРГОБЛОКУ № 2 ПІВДЕННОУКРАЇНСЬКОЇ АЕС НА НАВКОЛИШНЄ ПРИРОДНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ТА НАСЕЛЕННЯ (при використанні ТВЗ компанії «Вестінгаус»)

*Наведені результати розрахунків та обґрунтований радіаційний вплив на навколишнє природне середовище та населення проектної аварії, що обумовлена розривом трубопроводу першого контуру енергоблоку № 2 Південноукраїнської АЕС при використанні ТВЗ компанії «Вестінгаус». Показано, що максимально допустимі значення доз опромінення в органах і тканинах людини за межами СЗЗ, встановлені в НРБУ-97 та СП АС-88, не перевищуються.*

**Ключові слова:** проектна аварія, радіаційний вплив.

**Kartashov V. V.** INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT AND POPULATION OF A DESIGNED ACCIDENT WITH FIRST CIRCUIT STEAM GENERATOR HEADER COVER TEARING AT THE 2ND POWER UNIT OF SOUTH-UKRAINE NPP INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT AND POPULATION (under using of a “Westinghouse” company fuel assembly)

*An article contains the calculation results and justifications of radiation impact on the environment and population of a designed accident specified by the South-Ukraine NPP 2nd power unit first circuit pipelines tearing under using of a “Westinghouse” company fuel assembly. It is shown that maximum legal values of human organs an tissues equivalent and commitment exposure doses are not exceeded.*

**Keywords:** designed accident, radiation impact.