

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-119-126>

УДК 621.039.536

## ВВЭР-1000 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ ІШІНДЕ БІРІНШІ ОТЫНДЫҚ ЦИКЛДАН КЕЙІНГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАЛУЫН ЕСЕПТЕУ

Д. М. Секен\*, А. С. Сураев, Н. Е. Мухамедов, Р. А. Иркимбеков, О. М. Жанболатов

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

\* Байланыс үшін E-mail: [seken@nnc.kz](mailto:seken@nnc.kz)

Жұмыста MCNP6 кодын [1] және ENDF/B-VII кітапханаларын [2] пайдалана отырып, бірінші отын циклынан кейін ВВЭР-1000 реакторында радионуклидтердің жинақталуын нейтрондық-физикалық модельдеу ұсынылған. Негізгі ұзақ өмір сүретін бөлу өнімдерін ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$  және т.б.), актиноидтарды (Np, Pu, Am), асыл газдарды (Kr, Xe), сондай-ақ аэрозольді және құрамында йод бар радионуклидтерді құру бойынша есептеулер жүргізілді. Қалдық белсенділікті және жинақталған изотоптардың радиациялық қауіпсіздікке әсерін бағалауға ерекше назар аударылды. Зерттеу пайдаланылған ядролық отын (ПЯО) – мен және қатты радиоактивті қалдық (КРК) – мен жұмыс істеу стратегияларын әзірлеу, сақтау қоймаларын жобалау, Қазақстан Республикасында экологиялық тәуекелдерді бағалау және атом энергетикасын дамыту үшін қолданбалы мәнге ие.

**Түйін сөздер:** отынның жануы, радионуклидтер, пайдаланылған ядролық отын, қатты радиоактивті қалдықтар, белсенділік, радиациялық қауіпсіздік, нейтрондық-физикалық есептеулер, MCNP.

### КІРІСПЕ

Электр энергиясының орнықты көзі ретінде ядролық энергетиканы дамыту экологиялық қауіпсіздік мәселелеріне, атап айтқанда, пайда болатын радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеуге ерекше назар аударуды талап етеді. Атом электр станцияларының әлеуетті қауіптілігін айқындайтын түйінді факторлардың бірі ядролық реакторларды пайдалану процесінде радионуклидтердің жинақталуы болып табылады. Бөліну, басып алу және белсендіру нәтижесінде пайда болатын ұзақ өмір сүретін нуклидтерге ерекше назар аудару керек, өйткені олар жүздеген және мыңдаған жылдар бойы радиоуыттылығын сақтайды және отынның жануынан бастап оның соңғы оқшаулануына дейінгі барлық кезеңдерде ұзақ бақылауды талап етеді.

ВВЭР-1000 үлгісіндегі реакторлардың белсенді аймағы жағдайында бөлу өнімдері ғана емес, сондай-ақ актиноидтар, асыл газдар, аэрозольді нуклидтер, сондай-ақ йод изотоптары мен лантаноидтар жинақталады. Олардың көпшілігі реактордың нейтрондық-физикалық сипаттамаларына, отынды түсіргеннен кейін жылу бөлуге және ұзақ мерзімді сақтау параметрлерін негіздеуге әсер етеді. Мысалы, ксенон мен самарийдің изотоптары қуатты нейтрондық жұтқыштар болып табылады, ал  $^{99}\text{Tc}$  мен  $^{129}\text{I}$  қоршаған ортада өте ұтқыр және тіпті аз шоғырлануда да радиоуытты болып табылады.

Реактор жұмысының қауіпсіздігін бағалау, пайдаланылған отынмен жұмыс істеудің тиімді стратегияларын әзірлеу үшін, сондай-ақ Қазақстан Республикасында бірінші атом электр станциясын жоспарлау кезінде неғұрлым қауіпті радионуклидтердің жинақталуын модельдеуді жүргізу қажет. ENDF/B-VII кітапханаларымен MCNP6 сияқты қазіргі заманғы кодтарды пайдалану отын жанғаннан кейін оның

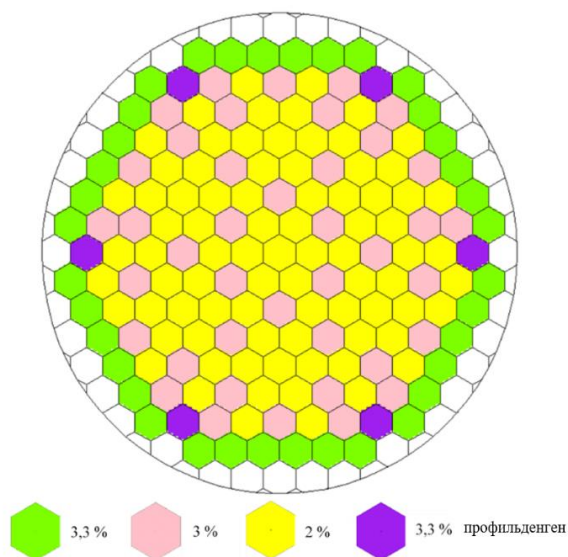
жоғары дәрежедегі сенімділігімен изотоптық құрамын есептеуге мүмкіндік береді.

MCNP6 бағдарламасын пайдалана отырып ВВЭР-1000 моделдеу бойынша есептеулер бұған дейін де сәтті жүргізілген, оның ішінде нейтрон-физикалық сипаттамалар да қарастырылған [3]. Осы жұмыс осы зерттеулердің қисынды жалғасы болып табылады және қуаттың нақты профилін, өтпелі режимдерді және негізгі изотоптардың концентрацияларының өзгеру динамикасын ескере отырып, отынның жануын талдауға бағытталған.

Бұл жұмыс отын циклы аяқталғаннан кейін ВВЭР-1000 реакторында радионуклидтердің жинақталуын зерттеуге бағытталған. Жүргізілген талдау тұрақты негізде пайдалану жағдайында пайда болатын бөлу өнімдерін, актиноидтарды, инертті газдар мен аэрозольдерді қамтиды. Алынған нәтижелер нейтрондық-физикалық модельдерді верификациялау, ПЯО сақтау жүйелерін әзірлеу кезінде және ядролық-энергетикалық жобаларды іске асыру кезіндегі экологиялық тәуекелдерді бағалауда пайдаланылуы мүмкін.

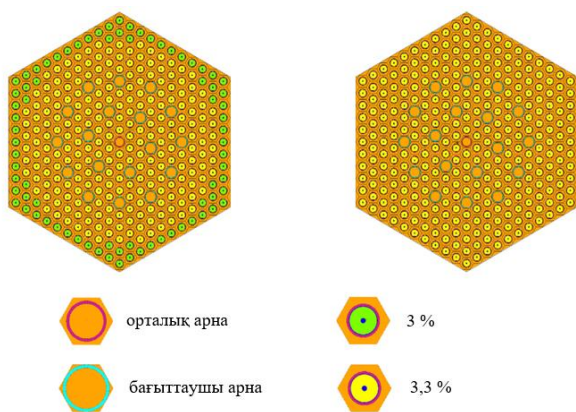
### ЗЕРТТЕУ ОБЪЕКТІСІ

Көптеген атом станцияларында номиналды жылу қуаты 3000 МВт (1000 МВт электр) ВВЭР-1000 реакторы пайдаланылады. Реактордың белсенді аймағында жалпы отын ( $\text{UO}_2$ ) жүктемесі 80,3 тонна болатын 163 жылу бөлгіш құрама (ЖБҚ) бар. Бастапқы активті аймақтағы отын партияларының саны 2% ( $^{235}\text{U}$ ), 3% ( $^{235}\text{U}$ ) және 3,3% ( $^{235}\text{U}$ ) байытылған 4 партияны құрайды [4]. Профильденген ЖБҚ-да 3% ( $^{235}\text{U}$ ) байытылған перифериялық отын элементтері бар (1-сурет). Активті аймақтың отын бөлігінің биіктігі 3530 мм, ал ЖБҚ арасындағы қашықтық 236 мм құрайды [5, 6].



1-сурет – ВВЭР-1000 реакторының активті аймағының конфигурациясы

ВВЭР-1000 реакторының ЖБҚ «кілт бойынша» өлшемі 234 мм болатын конструкция болып табылады және оның құрамына 312 отын элементі (твэл) кіреді, олар бір-бірінен 12,75 мм қадаммен теңбұрышты үшбұрышты схема бойынша біркелкі орналасқан (2-сурет). Әрбір ЖБҚ-да энергия бөлуді өлшеу датчиктерін орнату үшін 18 бағыттаушы арна және бір орталық арна орналастырылған. Бағыттаушы арналар тот баспайтын болаттан жасалған, ал орталық канал үшін 1% ниобий қосылған цирконий қорытпасы пайдаланылады. Орталық арнаның диаметрі 11 мм, әрбір бағыттаушы арнаның диаметрі 12,6 мм, ал олардың қабырғасының қалыңдығы 0,8 мм-ге тең.



2-сурет – ВВЭР-1000 реакторының профильденген (сол жақта) және профильденбеген (оң жақта) ЖБҚ-сы

Твэл герметикалық сыртқы қабықшадан тұрады, оның ішінде отын орналастырылады және бөлу өнімдері оқшауланады. Твэлге тығыздығы 10400 кг/м<sup>3</sup> уран диоксидінен жасалған цилиндрлік таблеткалар орналастырылған, әрқайсысының сыртқы диаметрі 7,53 мм. Отын бағанасының жалпы ұзындығы – 3530 мм. Отын таблеткасының ортасында шеттерін-

де фаскалары бар диаметрі 1,4 мм саңылау бар, бұл таблетка мен қабық арасындағы саңылаумен бірге таблетканың радиациялық ісінуінен ұлғаюын өтеуге мүмкіндік береді. Цирконий қорытпасынан жасалған твэлдің қабықшасы конструкцияның беріктігін қамтамасыз етеді, оның өлшемдерін тұрақты сақтайды және отынды жылу тасымалдағыштан туындаған коррозия мен эрозиядан қорғайды. Қабықшаның ішкі радиусы – 3,9 мм, ал сыртқы радиусы – 4,55 мм. Қабықша 1% ниобий қосылған цирконий қорытпасынан жасалған, ал отын мен қабықша арасындағы саңылау гелиймен толтырылған.

ВВЭР-1000 реакторында басқару және қорғау жүйесі реттеу органының 61 кластері орнатылған. Жүйеде 18 сіңіргіш элемент пайдаланылады, олардың жоғарғы бөлігі тығыздығы 1700 кг/м<sup>3</sup> (В<sub>4</sub>С құрамында табиғи <sup>10</sup>B ≈ 19,9%, <sup>11</sup>B ≈ 80,1%) бор карбидінен, ал төменгі бөлігі тығыздығы 4900 кг/м<sup>3</sup> (Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·TiO<sub>2</sub>, диспрозий табиғи изотоптық құрамда) диспрозия титанатынан жасалған. Сіңіргіштің толық биіктігі 3530 мм құрайды, бұл ретте жоғарғы бөлігінің биіктігі – 3230 мм, ал төменгі бөлігінің биіктігі – 300 мм. Сіңіргіш элементтер қабығының сыртқы диаметрі 0,6 мм қалыңдығы 8,2 мм құрайды және ол тот баспайтын болаттан жасалған.

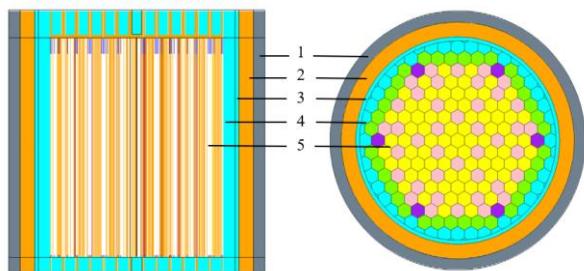
#### НЕЙТРОНДЫ-ФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛЬ

ВВЭР-1000 реакторының барлық активті аймағын нейтрондық талдауды орындау үшін ENDF/B-VII.0 ядролық деректер кітапханаларын пайдалана отырып, Монте-Карло әдісіне негізделген компьютерлік MCNP6 коды пайдаланылды.

MCNP6 кодында отынның жануын есептеу реакторды пайдалану процесінде отынның изотоптық құрамының өзгерістерін ескеруге мүмкіндік беретін BURN есептік модулін пайдалана отырып орындалады. Бұл модуль уақытша қадамдарды (TIME), реактордың қуатын (POWER), сәулеленетін материалдарды (MAT) және изотоптардың ең аз шоғырлануын (AFMIN) қоса алғанда, отынның жануын есептеу параметрлерін белгілейді. BURN-ді есепке енгізу отын циклы бойына белсенді аймақтың нейтрондық-физикалық сипаттамаларын неғұрлым дәл болжауға мүмкіндік береді және реактор моделін дұрыс верификациялауға ықпал етеді.

3-суретте MCNP6 кодының көмегімен әзірленген ВВЭР-1000 реакторының активті аймағының толық геометриялық моделі көрсетілген. Модель ВВЭР-1000 реакторының активті аймағының барлық өлшемдік-материалдық сипаттамаларын дәл сипаттайды және активті аймақтың барлық қажетті компоненттерін қамтиды: (1) жылу бөлетін элементтері бар отын құрастырмалары, (2) жоғарғы, төменгі және бүйірлік шағылыстырғыштар, (3) қуатты реттеу органдары, (4) конструкциялық элементтер. Модельді визуализациялау VisEd редакторында орындалған, оны пайдалану модельдің құрылымы мен орналасуын көрнекі түрде көрсетуге мүмкіндік береді, бұл оны құру мен жөндеуді жеңілдетеді.

# ВВЭР-1000 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ ІШІНДЕ БІРІНШІ ОТЫНДЫҚ ЦИКЛДАН КЕЙІНГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАЛУЫН ЕСЕПТЕУ



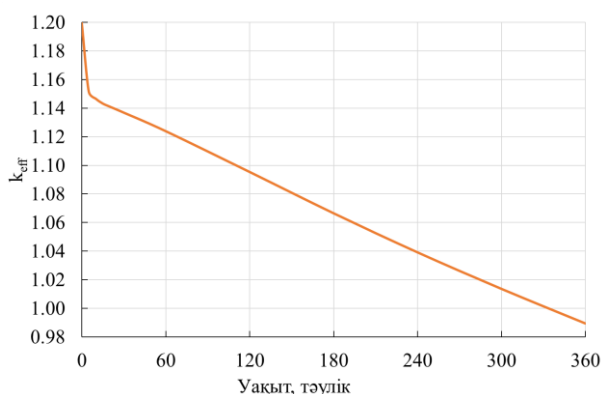
1 – корпус, 2 – шағылыстырғыш, 3 – шахта, 4 – қоршау, 5 – активті аймақ

3-сурет – Реакторлық есептік моделінің графикалық көрінісі

## ЕСЕПТЕМЕЛЕРДІҢ НӘТИЖЕСІ

Моделді верификациялау үшін нейтрондардың көбею коэффициенті бор шоғырлануы 600 ppm, ал жылу тасығыш пен отын температурасы 300 К болған жағдайда есептелген. Жұмыс тобын (№ 10 топ) басқару өзектері негізден 80% қашықтықта бекітілген деп болжанады [7]. Бұл ереже басқару өзектерінің орташа мәні ретінде қабылданды, өйткені жұмыс тобы цикл ішінде 70% -дан 90% -ға дейін қозғалады.  $k_{eff}$  мәні  $1,13518 \pm 0,00007$ , ал әдеби деректер бойынша 1,13554 тең екені анықталды. Салыстырмалы қателік 0,032% құрады.

5-суретте реактордың жұмысын бір науқан ішінде номиналды қуатта модельдеу кезінде нейтрондардың көбеюінің тиімді коэффициентін өзгерту кестесі көрсетілген, бұл ретте келесі шарттар қабылданған: отынның температурасы 600 К, жылу тасымалдағыштың температурасы – 600 К, жылу тасымалдағыштың тығыздығы – 700 кг/м<sup>3</sup>, ал реактордың жылу қуаты – 3000 МВт, бор қышқылының.



4-сурет –  $k_{eff}$  мәндерін уақыт бойынша өзгеруі

**Ұзақ өмір сүретін нуклидтер бойынша верификация.** 1-кестедегі нуклидтер 10 жылдан астам жартылай ыдырау кезеңіне ие және пайдаланылған ядролық отынның жалпы радиоактивтілігіне барынша үлес қосады. Олардың қасиеттерін, көші-қон қабілетін және биосфераға әсер ету дәрежесін зерделеу радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу стратегиясын негіздеу, көму немесе қайта өңдеу түрін таңдау,

сондай-ақ әртүрлі пайдалану сценарийлері мен авариялық жағдайлар кезіндегі әлеуетті салдарларды бағалау үшін қажет.

Ядролық реакторды ұзақ уақыт пайдалану кезінде (номиналды қуатында 100 жылдан астам) бөлу өнімдерінің радиоактивтілік деңгейі тепе-теңдік жағдайына жетеді. Бұл кезеңде радиоактивтілікке <sup>90</sup>Sr үлкен үлес қосады. Оның шоғырлануы және тиісінше радиоактивтіліктің жалпы деңгейі отын циклінің типіне байланысты. Мысалы, ашық отын циклы үшін ол шамамен  $2,4 \cdot 10^{17}$  л Н<sub>2</sub>O/ГВт қуатты құрайды, ал тұйық циклда PWR типті реакторларда оксидті отынды пайдаланумен бұл көрсеткіш  $1,2 \cdot 10^{17}$  л Н<sub>2</sub>O/ГВт дейін төмендейді [8]. Алайда ұзақ мерзімді перспективада – АЭС-ті пайдалану аяқталғаннан кейін бірнеше жүз жылдан кейін – қауіптіліктің жоғары деңгейін сақтайтын және пайдаланылған ядролық отынмен жұмыс істеу кезінде ерекше көңіл бөлуді талап ететін басқа да ұзақ өмір сүретін радионуклидтер: <sup>99</sup>Tc, <sup>129</sup>I, <sup>126</sup>Sn және <sup>93</sup>Zr айқын-даушы маңызға ие бола бастайды.

1-кесте – Бөлу өнімдерінің құрамына кіретін ұзақ өмір сүретін негізгі нуклидтердің түзілуі

| Нуклид            | Жартылай ыдырау кезеңі, жыл | [7] деректері бойынша 1 жылда жинақталуы, кг | Есептеу нәтижелері бойынша 1 жылда жинақталуы, кг | Салыстырмалы қателік, % |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------|
| <sup>90</sup> Sr  | 28,6                        | 19,30                                        | 20,29                                             | 5,13                    |
| <sup>99</sup> Tc  | $2,12 \cdot 10^5$           | 27,10                                        | 26,67                                             | 1,59                    |
| <sup>126</sup> Sn | $2,30 \cdot 10^5$           | 0,63                                         | 0,54                                              | 14,28                   |
| <sup>129</sup> I  | $1,57 \cdot 10^7$           | 6,15                                         | 4,62                                              | 24,88                   |
| <sup>135</sup> Cs | $2,30 \cdot 10^6$           | 11,90                                        | 7,90                                              | 33,61                   |
| <sup>137</sup> Cs | 30                          | 41,50                                        | 41,12                                             | 0,91                    |
| <sup>151</sup> Sm | 90                          | 0,41                                         | 0,38                                              | 7,32                    |

Атом электр станциясын пайдалану процесінде қалыптасатын ұзақ өмір сүретін радиоактивтіліктің жинақталуы ядролық энергетиканың экологиялық және радиациялық салдарларын бағалау кезінде маңызды фактор болып табылады. Ұзақ өмір сүретін радиоактивтілік, ең алдымен, актиноидтардың және жартылай ыдыраудың ұзақ кезеңімен бөліну өнімдерінің болуымен байланысты.

**Актиноидтардың жинақталуы.** 2-кесте пайдалану циклі ішінде реакторда мұндай нуклидтердің қаншалықты қарқынды өндірілетінін талдауға мүмкіндік беретін радиоактивтіліктің сандық бағалауын қамтиды. Бұл деректер пайдаланылған ядролық отынмен жұмыс істеу стратегиясын таңдау үшін маңызды.

Актиноидты элементтер реактордың активті аймағында нейтрондарды ауыр ядролармен, атап айтқанда <sup>238</sup>U, кейіннен β-ыдыраумен басып алудың жүйелі реакциялары нәтижесінде қалыптасады. Массасы мен радиоактивтілігі бойынша неғұрлым маңыздылардың қатарына плутоний (<sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu) және <sup>237</sup>Np изотоптары жатады. Олар пайдала-

## ВВЭР-1000 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ ІШІНДЕ БІРІНШІ ОТЫНДЫҚ ЦИКЛДАН КЕЙІНГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАЛУЫН ЕСЕПТЕУ

нылған отынның ұзақ мерзімді белсенділігін анықтайды және оны сақтау, қайта өңдеу немесе қайта пайдалану мүмкіндігі кезінде ерекше тәсілді талап етеді.

2-кесте – Актиноидтардың құрылуы

| Нуклид            | Активтілігі, Бк       | Массасы жылына, кг    |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| <sup>234</sup> U  | $1,166 \cdot 10^{10}$ | $5,067 \cdot 10^{-2}$ |
| <sup>236</sup> U  | $3,885 \cdot 10^{11}$ | $1,624 \cdot 10^2$    |
| <sup>237</sup> U  | $1,497 \cdot 10^{18}$ | $4,958 \cdot 10^{-1}$ |
| <sup>239</sup> U  | $6,623 \cdot 10^{19}$ | $5,340 \cdot 10^{-2}$ |
| <sup>235</sup> Np | $2,989 \cdot 10^9$    | $5,760 \cdot 10^{-8}$ |
| <sup>236</sup> Np | $9,148 \cdot 10^6$    | $1,878 \cdot 10^{-5}$ |
| <sup>237</sup> Np | $2,522 \cdot 10^{11}$ | $9,668 \cdot 10^0$    |
| <sup>238</sup> Np | $3,600 \cdot 10^{17}$ | $3,755 \cdot 10^{-2}$ |
| <sup>239</sup> Np | $6,601 \cdot 10^{19}$ | $7,690 \cdot 10^0$    |
| <sup>238</sup> Pu | $4,326 \cdot 10^{10}$ | $2,239 \cdot 10^{-6}$ |
| <sup>237</sup> Pu | $1,163 \cdot 10^{12}$ | $2,577 \cdot 10^{-6}$ |
| <sup>238</sup> Pu | $9,842 \cdot 10^{14}$ | $1,553 \cdot 10^0$    |
| <sup>239</sup> Pu | $8,014 \cdot 10^{14}$ | $3,493 \cdot 10^2$    |
| <sup>240</sup> Pu | $6,300 \cdot 10^{14}$ | $7,505 \cdot 10^1$    |
| <sup>241</sup> Pu | $1,343 \cdot 10^{17}$ | $3,512 \cdot 10^1$    |
| <sup>242</sup> Pu | $9,065 \cdot 10^{11}$ | $6,195 \cdot 10^0$    |

**Асыл газдар мен ұшатын радионуклидтердің жинақталуы.** <sup>133</sup>Xe, <sup>135</sup>Xe, <sup>85</sup>Kr және басқалары сияқты бөліну өнімдері жоғары радиоактивтілікке ие және реактордың нейтрондық-физикалық сипаттамаларына айтарлықтай әсер етеді (3-кесте). Есептеулерде <sup>135</sup>Xe изотопына ерекше назар аударылады, ол жылу нейтрондарын (~ 2,7·10<sup>6</sup> барн) қармаудың үлкен қимасына ие. Бұл оны әсіресе қуаты төмендеген кезде немесе реактор тоқтағаннан кейін реактивтіліктің ксенондық тербелісін тудыруға қабілетті қуатты нейтронды уға айналдырады. Есептеулерде <sup>135</sup>Xe белсенділігі  $1,06 \cdot 10^{18}$  Бк құрайтыны анықталды, бұл оның реактордың ауыспалы режимдегі әрекетіне әсерін ескеру қажеттігін растайды.

Жоғары активтілікке ие <sup>133</sup>Xe мен <sup>85</sup>Kr – тиісінше  $6,25 \cdot 10^{18}$  Бк және  $1,31 \cdot 10^{16}$  Бк кем емес. Бұл изотоптар іс жүзінде инертті және твэлдердің газ кеңістігінде жинақталады. Герметикалық бұзылған кезде олар жылу тасымалдағышқа шығады және радиациялық газ талдағыштардың көмегімен тіркелуі мүмкін, бұл оларды твэлдердің тұтастығының индикаторларына айналдырады.

Асыл газдар мен құрамында йод бар нуклидтердің массасы мен белсенділігінің есептелген мәндері 3-кестеде келтірілген. Салмағының аздығына қарамастан (жылына 1 кг-нан аз), олардың белсенділігі  $10^{16}$ – $10^{18}$  Бк деңгейіне жетеді, бұл авариялық ағып кету кезінде әлеуетті радиациялық қауіптілікке және газ тазалау мен желдетудің тиімді жүйелерін жобалау қажеттілігіне себепші болады [9].

Ядролық отынның бөлінуі процесінде ВВЭР-1000 реакторының активті аймағында әртүрлі газ тәрізді және ұшатын радионуклидтер қалыптасады, олардың

ішінде йод (<sup>129</sup>I, <sup>132</sup>I, <sup>131</sup>I, <sup>135</sup>I), теллур (<sup>132</sup>Te) изотоптарына ерекше назар аударуға болады. 3-кестеде көрсетілген есептеулер негізінде реакторды пайдаланудың бір жылда жинақталған олардың активтілігі мен массасына сандық бағалау жүргізілді.

3-кесте – Газ тәріздес және ұшатын нуклидтер

| Нуклид            | Активтілігі, Бк        | Массасы жылына, кг    |
|-------------------|------------------------|-----------------------|
| <sup>85</sup> Kr  | $1,3109 \cdot 10^{16}$ | $9,022 \cdot 10^{-1}$ |
| <sup>132</sup> Te | $4,3216 \cdot 10^{18}$ | $3,846 \cdot 10^{-1}$ |
| <sup>129</sup> I  | $3,0213 \cdot 10^{10}$ | $4,621 \cdot 10^0$    |
| <sup>130</sup> I  | $2,895 \cdot 10^{16}$  | $4,008 \cdot 10^{-4}$ |
| <sup>131</sup> I  | $3,0478 \cdot 10^{18}$ | $6,635 \cdot 10^{-1}$ |
| <sup>135</sup> I  | $5,745 \cdot 10^{18}$  | $4,393 \cdot 10^{-2}$ |
| <sup>133</sup> Xe | $6,263 \cdot 10^{18}$  | $9,039 \cdot 10^{-1}$ |
| <sup>135</sup> Xe | $1,059 \cdot 10^{18}$  | $1,126 \cdot 10^{-2}$ |

Құрамында йод бар барлық нуклидтердің ішінен <sup>135</sup>I –  $5,74 \cdot 10^{18}$  Бк қысқа өмір сүретін изотопы оның қарқынды пайда болуымен және радиоактивтілігінің жоғары деңгейімен байланысты. Одан кейін <sup>131</sup>I ( $3,05 \cdot 10^{18}$  Бк) және <sup>130</sup>I ( $2,89 \cdot 10^{16}$  Бк) келеді. Аса маңызды <sup>131</sup>I болып табылады, өйткені ол жоғары биологиялық тиімділік пен қалқанша безінде шоғырлану қабілетінің арқасында ағып кету жағдайында персонал мен халық үшін ең үлкен қауіп төндіреді. Оның белсенділігі санитарлық нормативтердің деңгейімен салыстырылады және АЭС пайдалану кезінде қатаң бақылауды талап етеді. Ұзақ өмір сүретін <sup>129</sup>I салмағы 4,6 кг болғанда  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк – ден аз белсенділікке ие, бұл оны қысқа мерзімді перспективада қауіпсіз етеді, алайда ол ұзақ мерзімді экологиялық перспективада жартылай ыдыраудың орасан зор кезеңіне (~16 млн жыл) байланысты әлеуетті қауіп төндіреді.

Сондай-ақ массасы 0,4 кг-нан кем болған кезде <sup>132</sup>Te –  $4,3216 \cdot 10^{18}$  Бк айтарлықтай белсенділікті көрсетеді, бұл оны твэлдердің бұзылуы мен герметикалықтың бұзылуының бастапқы кезеңдерінің маңызды маркеріне айналдырады.

**Отын циклынан кейінгі аэрозольдық белсенділік және радиациялық әсерді бағалау.** Аэрозольдер отын жанғаннан кейін радиоактивті заттарды қоршаған ортаға тасымалдаудың маңызды нысандарының бірі болып табылады. Көбінесе инертті радиоактивті газдардың бөліну өнімдері мен еншілес изотоптарынан құралатын аэрозольдер күрделі нуклидті құраммен және жоғары радиобиологиялық қауіптілікпен сипатталады. Олардың ішіндегі ең маңыздысы <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, <sup>95</sup>Zr, <sup>99</sup>Mo, <sup>103</sup>Ru, <sup>106</sup>Ru, <sup>134</sup>Cs, <sup>141</sup>Ce и <sup>144</sup>Ce және басқа да [10] нуклидтер болып табылады, олар бойынша деректер 4-кестеде келтірілген.

Қаралған аэрозольді нуклидтер арасында цирконий мен рутений изотоптары неғұрлым белсенділікті көрсетеді: <sup>95</sup>Zr ( $5,19 \cdot 10^{18}$  Бк), <sup>103</sup>Ru ( $4,03 \cdot 10^{18}$  Бк) және <sup>106</sup>Ru ( $6,62 \cdot 10^{17}$  Бк). Бұл нуклидтер авариялық шығарындылардан кейін және твэлдердің зақымдалу жағдайында қалдық радиоактивтілікті қалыптасты-

## ВВЭР-1000 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ ІШІНДЕ БІРІНШІ ОТЫНДЫҚ ЦИКЛДАН КЕЙІНГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАЛУЫН ЕСЕПТЕУ

руда негізгі рөл атқарады. Сондай-ақ отынның жану индикаторы ретінде жиі қолданылатын және твэлді бұзғаннан кейін аэрозольді фазада болатын  $^{99}\text{Mo}$  ( $5,15 \cdot 10^{18}$  Бк) маңызды мәнге ие.  $^{134}\text{Cs}$  мен  $^{90}\text{Sr}$  активтілігі тиісінше  $1,18 \cdot 10^{17}$  Бк және  $1,06 \cdot 10^{17}$  Бк құрайды, бұл олардың ұзақ мерзімді сыртқы және ішкі сәулелену көздері ретіндегі маңыздылығын растайды.

Бір жылда пайда болған нуклидтердің массасы тіпті кішігірім массалар (мысалы,  $^{99}\text{Mo}$  – жылына 0,29 кг) өте жоғары белсенділікпен қатар жүруі мүмкін екенін көрсетеді, бұл қатаң радиациялық бақылау қажеттігін көрсетеді.  $^{90}\text{Sr}$  (20,29 кг/жыл) және  $^{144}\text{Ce}$  (22,69 кг/жыл) сияқты массасы үлкен изотоптар да жоғары көші-қон қозғалысы және радиоуыттылыққа елеулі үлесі бар аэрозольдардың құрамына кіреді.

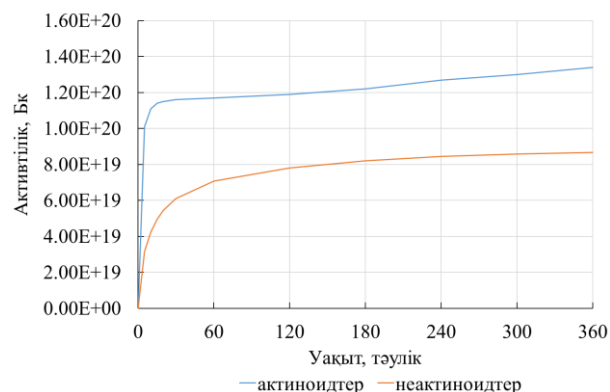
Зақымдалған твэлдерден ағып шыққан кезінде аэрозольдар шығарындылардағы ұзақ өмір сүретін радионуклидтердің жалпы белсенділігінің 10% -дан 80% -ға дейін құрауы мүмкін. Бұл деректер ПЯО уақытша сақтау қоймаларындағы сүзгіш жүйелерді, желдеткішті жобалау кезінде және қызметкерлер мен халықтың сәулеленуін бағалау кезінде аса маңызды. Отынды түсіргеннен кейін аэрозольдерді есептеу де бөгеттердің тұтастығы бұзылған кезде радионуклидтердің таралуын болжауға және радиоактивті қалдықтармен жұмыс істеу кезеңінде қорғау шараларын қалыптастыруға мүмкіндік береді [11].

4-кесте – Аэрозольдер

| Нуклид            | Белсенділігі, Бк      | Массасы жылына, кг    |
|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| $^{89}\text{Sr}$  | $3,238 \cdot 10^{18}$ | $3,012 \cdot 10^0$    |
| $^{90}\text{Sr}$  | $1,061 \cdot 10^{17}$ | $2,029 \cdot 10^1$    |
| $^{95}\text{Zr}$  | $5,187 \cdot 10^{18}$ | $6,522 \cdot 10^0$    |
| $^{99}\text{Mo}$  | $5,154 \cdot 10^{18}$ | $2,901 \cdot 10^{-1}$ |
| $^{103}\text{Ru}$ | $4,033 \cdot 10^{18}$ | $3,371 \cdot 10^0$    |
| $^{106}\text{Ru}$ | $6,623 \cdot 10^{17}$ | $5,395 \cdot 10^0$    |
| $^{134}\text{Cs}$ | $1,182 \cdot 10^{17}$ | $2,469 \cdot 10^0$    |
| $^{141}\text{Ce}$ | $4,958 \cdot 10^{18}$ | $4,700 \cdot 10^0$    |
| $^{144}\text{Ce}$ | $2,673 \cdot 10^{18}$ | $2,269 \cdot 10^1$    |

**Жиынтық активтілікті есептеу.** 5-суретте ұсынылған деректер реакторда отынның жылдық сәулелену процесінде неактиноидтар мен актиноидтардың радиоактивтілігінің өсуін көрсетеді. Бастапқы кезеңде (алғашқы 10 тәулік) белсенділіктің күрт артуы байқалады: неактиноидтар үшін  $4,26 \cdot 10^{19}$  Бк дейін және актиноидтар үшін  $1,11 \cdot 10^{20}$  Бк дейін, бұл қысқа мерзімдік бөліну өнімдері мен трансурандық элементтердің қарқынды жиналуымен байланысты. Одан әрі активтіліктің өсуі баяулайды, бірақ науқанның соңына дейін жалғасады: 360 тәулікке қарай неактиноидтардың белсенділігі  $8,66 \cdot 10^{19}$  Бк, ал актиноидтар  $1,34 \cdot 10^{20}$  Бк жетеді. Циклдің барлық кезеңінде актиноидтардың белсенділігі неактиноидтардың белсенділігінен асып түседі, бұл олардың үлкен меншікті радиоактивтілігіне және жануға төзімділігіне байланысты. Алынған нәтижелер радиациялық

қауіптілікті бағалау және ПЯО-мен жұмыс істеу жүйелерін жобалау кезінде изотоптар топтары бойынша да, уақыт бойынша да белсенділікті есепке алу қажеттілігін көрсетеді.



5-сурет – Уақыт бойынша активтіліктің өзгеруі

**Жоғары активті бөліну өнімдері.** 5-кестеде ұсынылған жоғары активті бөліну өнімдері ВВЭР-1000 реакторындағы отын циклы аяқталғаннан кейін пайдаланылған ядролық отынның радиациялық фонының едәуір бөлігін қалыптастырады. Бұл радионуклидтер салыстырмалы түрде аз массада да жоғары меншікті белсенділікпен сипатталады, бұл оларды қалдық жылу бөледі, радиациялық қорғауды және ПЯО қоймаларын жобалауды есептеудің маңызды объектілеріне айналдырады. Мұндай нуклидтер қатарына  $^{91}\text{Y}$ ,  $^{95}\text{Nb}$ ,  $^{140}\text{Ba}$ ,  $^{143}\text{Pr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  және басқа изотоптар жатады [12]. Олардың кейбіреулері,  $^{95}\text{Nb}$  және  $^{140}\text{La}$  сияқты,  $3,7 \cdot 10^{18}$  Бк -ден жоғары активтілікті көрсетеді, бұл түсірілгеннен кейінгі алғашқы айларда отынның қалдық радиациясында олардың үстем ролін көрсетеді.

Кесте деректерін талдау ең жоғары активтілікті  $^{140}\text{La}$  ( $5,43 \cdot 10^{18}$  Бк) және  $^{140}\text{Ba}$  ( $5,33 \cdot 10^{18}$  Бк) көрсетінін көрсетеді, бұл олардың тез пайда болуымен және ыдырауының жоғары жылдамдығымен байланысты.  $^{95}\text{Nb}$  ( $5,17 \cdot 10^{18}$  Бк) және  $^{120}\text{Ce}$  ( $4,44 \cdot 10^{18}$  Бк), салыстырмалы түрде аз салмаққа қарамастан, олардың жоғары радиоуыттылығы мен энергетикалық маңыздылығын көрсете отырып, едәуір активтілікке ие. Активтілігі елеулі  $^{137}\text{Cs}$  (41,12 кг) және  $^{90}\text{Sr}$  (20,29 кг) неғұрлым жаппай изотоптар болып табылады, олар ағзада жинақталуға қабілетті болғандықтан, ұзақ жартылай ыдырау және биологиялық маңыздылығы бар.

Сонымен қатар, осы изотоптардың едәуір бөлігі биологиялық қауіп төндіреді – мысалы,  $^{90}\text{Sr}$  мен  $^{137}\text{Cs}$  адам ағзасында жинақталуға қабілетті, ал европий мен самарий изотоптарының нейтрондарды басып алудың жоғары қимасы бар, бұл отынның реактивтілігіне әсер етеді. Бұл нуклидтерді есепке алу қызметкерлерді радиациялық қорғауды қамтамасыз ету, қойманың конструкциялық материалдарын оңтайлы тандау, сондай-ақ жану үлгілерін калибрлеу және отынды пайдалану тереңдігін бағалау үшін қажет.

# ВВЭР-1000 РЕАКТОРЫНЫҢ ЖБҚ ІШІНДЕ БІРІНШІ ОТЫНДЫҚ ЦИКЛДАН КЕЙІНГІ РАДИОНУКЛИДТЕРДІҢ ЖИНАЛУЫН ЕСЕПТЕУ

5-кесте – Жоғары активті бөліну өнімдері

| Нуклид            | Активтілігі, Бк        | Массасы жылына, кг     |
|-------------------|------------------------|------------------------|
| <sup>86</sup> Rb  | 2,961·10 <sup>15</sup> | 9,809·10 <sup>-4</sup> |
| <sup>90</sup> Y   | 1,104·10 <sup>17</sup> | 5,486·10 <sup>-3</sup> |
| <sup>91</sup> Y   | 4,111·10 <sup>18</sup> | 4,530·10 <sup>0</sup>  |
| <sup>95</sup> Nb  | 5,165·10 <sup>18</sup> | 3,548·10 <sup>0</sup>  |
| <sup>105</sup> Ru | 2,558·10 <sup>18</sup> | 1,028·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>105</sup> Rh | 2,208·10 <sup>18</sup> | 7,064·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>111</sup> Ag | 1,122·10 <sup>17</sup> | 1,920·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>125</sup> Sn | 2,567·10 <sup>16</sup> | 6,399·10 <sup>-3</sup> |
| <sup>124</sup> Sb | 5,525·10 <sup>14</sup> | 8,531·10 <sup>-4</sup> |
| <sup>125</sup> Sb | 1,064·10 <sup>16</sup> | 2,742·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>126</sup> Sb | 1,998·10 <sup>15</sup> | 6,457·10 <sup>-4</sup> |
| <sup>136</sup> Cs | 6,360·10 <sup>16</sup> | 2,355·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>137</sup> Cs | 1,325·10 <sup>17</sup> | 4,112·10 <sup>1</sup>  |
| <sup>140</sup> Ba | 5,335·10 <sup>18</sup> | 1,970·10 <sup>0</sup>  |
| <sup>140</sup> La | 5,434·10 <sup>18</sup> | 2,642·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>143</sup> Ce | 4,440·10 <sup>18</sup> | 1,806·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>142</sup> Pr | 8,839·10 <sup>16</sup> | 2,068·10 <sup>-3</sup> |
| <sup>143</sup> Pr | 4,566·10 <sup>18</sup> | 1,832·10 <sup>0</sup>  |
| <sup>147</sup> Nd | 1,938·10 <sup>18</sup> | 6,471·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>147</sup> Pm | 3,253·10 <sup>17</sup> | 9,479·10 <sup>0</sup>  |
| <sup>148</sup> Pm | 4,289·10 <sup>17</sup> | 7,049·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>149</sup> Pm | 1,257·10 <sup>18</sup> | 8,566·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>151</sup> Pm | 5,020·10 <sup>17</sup> | 1,856·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>153</sup> Sm | 8,495·10 <sup>17</sup> | 5,183·10 <sup>-2</sup> |
| <sup>154</sup> Eu | 5,446·10 <sup>15</sup> | 5,447·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>155</sup> Eu | 3,565·10 <sup>15</sup> | 1,955·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>156</sup> Eu | 2,681·10 <sup>17</sup> | 1,314·10 <sup>-1</sup> |
| <sup>157</sup> Eu | 4,588·10 <sup>16</sup> | 9,429·10 <sup>-4</sup> |
| <sup>160</sup> Tb | 5,486·10 <sup>14</sup> | 1,313·10 <sup>-3</sup> |

Ақырында, осы нуклидтердің кейбіреулері, әсіресе сирек кездесетін элементтер (Nd, Pr, Sm), нейтронды-физикалық есептеулерді анықтау және верификациялау үшін маркерлер ретінде пайдаланылуы мүмкін. Осылайша, осы радионуклидтердің құрамын талдау және бақылау ядролық энергетикалық қондырғыларды қауіпсіз және тиімді пайдаланудың ажырамас бөлігі болып табылады.

## ҚОРЫТЫНДЫЛАР

Бұл жұмыста ВВЭР-1000 реакторының активті аймағын нейтронды-физикалық модельдеу MCNP6 кодын пайдалану арқылы орындалды, отынның жануын есептеу және бірінші отын циклынан кейін радионуклидтердің пайда болуын талдау жүргізілді. Алынған нәтижелер модельдің жоғары сенімділігін көрсетеді: радионуклидтер массасының есептелген мәндерінің әдеби деректерден ауытқуы, бұл таңдалған модельдеу параметрлері мен қолданылған ядролық кітапханалардың дұрыстығын растайды.

Негізгі ұзақ өмір сүретін бөліну өнімдерінің ішінде жинақталудың ең жоғары мәндерін <sup>137</sup>Cs (41,12 кг), <sup>90</sup>Sr (20,29 кг) және <sup>99</sup>Tc (26,67 кг) изотоптары көрсетті, бұл оларды пайдаланылған ядролық

отынның радиоуыттылығын бағалау кезінде негізгі етеді. Актиноидтар арасында ең көп салмақ <sup>239</sup>Pu (349,3 кг), <sup>240</sup>Pu (75,05 кг) және <sup>241</sup>Pu (35,12 кг) байқалады, олар ПЯО-да плутоний компонентінің негізін құрайды және тұйық отын циклінде ықтимал пайдаланылуы мүмкін. Бұдан басқа, ұзақ мерзімді радиациялық бақылау үшін маңызы бар <sup>237</sup>Np (9,67 кг) және <sup>236</sup>U (162,4 кг) жинақталуы бойынша деректер алынды.

<sup>134</sup>Xe (51,34 кг), <sup>132</sup>Xe (32,52 кг) және <sup>136</sup>Xe (80,13 кг) сияқты асыл газдар генерациясы желдету және герметизациялау жүйелерін жобалау кезінде, сондай-ақ твэл қабықтарының тұтастығын диагностикалау кезінде оларды есепке алу қажеттілігін растайды. Аэрозольді құрамдас бөлікті талдау жылына 39,91 кг <sup>133</sup>Cs, 22,69 кг <sup>144</sup>Ce және 20,29 кг <sup>90</sup>Sr пайда болатынын анықтады, бұл герметикалықтың бұзылуы кезіндегі шығарындылардағы белсенділіктің байқалатын деңгейіне сәйкес келеді.

ВВЭР-1000 реакторында радионуклидтердің жинақталуын модельдеу ПЯО-ның радиологиялық және технологиялық сипаттамаларын бағалауға, қалдықтармен жұмыс істеу жөніндегі шараларды негіздеуге және экологиялық тәуекелдерді азайтуға мүмкіндік береді. Осы жұмыстың нәтижелері Қазақстан Республикасындағы болашақ атом энергетикасы объектілерінде радиоактивті материалдарды сақтау, қайта өңдеу және көму жүйелерін жобалау кезінде пайдаланылуы мүмкін.

*Жұмыс қатты радиоактивті қалдықтарды қайта өңдеу технологиясын (BR24993118) таңдау және іске асыру негіздемесі бойынша F3Ж жобасы шеңберінде орындалды.*

## ӘДЕБИЕТТЕР

1. MCNP6 Monte Carlo NeParticle Transport Code System, MCNP6.1, LANL, 2013.
2. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. Nuclear Data Sheets (2006)
3. Sken, D.M.; Surayev, A.S.; Irkimbekov, R.A.; Vityuk, G.A.; Mukhamedov, N.Y.; Zhanbolatov, O.M.; and Vityuk, V.A. Development Of A Neutronic Model Of The Wwer-1000 Reactor Facility Core // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2025. – Vol. 9, No. 2. – Art. 6. <https://doi.org/10.69912/2616-8537.1248>
4. In-core Fuel Management Code Package Validation for WWERs', IAEA-TECDOC-847, November 1995.
5. С.А. Андрушенко, ВВЭР-1000 үлгісіндегі реакторы бар АЭС. Пайдаланудың физикалық негіздерінен жобаның эволюциясына дейін С.А. Андрушенко, А.М. Афронов, Б.Ю. Васильев, В.Н. Генералов, К.Б. Косоуров, Ю.М. Семченков, В.Ф. Украинцев. – М.: Логос, 2010. – 604 бет.
6. Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core. – 2009.

7. Bulbul Ahammed D. A. A. S. From VVER-1000 to VVER-1200: Studying the impact of core changes. – 2024.
  8. Б.Р. Бергельсон, С.А. Балюк. Ядролық энергетиканың U-Pu отын циклінде ұзақ өмір сүретін радиоуыттылықтың жинақталуын талдау // Атом энергиясы. – 1996. – 80. Т. – № 1. – 37–43 беттер.
  9. Ю.В. Чечеткин, Ю.В. Чечеткин, Е.К. Якшин, В.М. Ещеркин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 бет.
  10. Е.И. Коптелов Радиметрия – ВМФ / Е.И. Коптелов, Г.И. Котивец. – 1972. – 535 бет.
  11. Ю.П. Ковбасенко, «Вестингауз» және «ТВЭЛ» компанияларының пайдаланылған отынның изотоптық құрамын салыстырмалы талдау. – 2016.
  12. Ю.А. Корчева және т.б. Беларусь АЭС пайдаланылған ядролық отынмен ұзақ уақыт жұмыс істеу кезінде негізгі радиациялық қауіпті радионуклидтердің номенклатурасы бойынша белсенділік қорларын бағалау // Беларусь Ұлттық ғылым академиясының жаңалықтары. Физика-техникалық ғылымдар сериясы. – 2020. – 65 Т. – № 2. – 243–251 бет.  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>
- REFERENCES**
1. MCNP6 Monte Carlo NeParticle Transport Code System, MCNP6.1, LANL, 2013.
  2. ENDF/B-VII.0: next generation evaluated nuclear data library for nuclear science and technology. Nuclear Data Sheets (2006)
  3. Seken, D.M.; Surayev, A.S.; Irkimbekov, R.A.; Vityuk, G.A.; Mukhamedov, N.Y.; Zhanbolatov, O.M.; and Vityuk, V.A. Development of a Neutronic Model of the WVER-1000 Reactor Facility Core // Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2025. – Vol. 9, No. 2. – Art. 6. <https://doi.org/10.69912/2616-8537.1248>
  4. In-core Fuel Management Code Package Validation for WWERs', IAEA-TECDOC-847, November 1995.
  5. Andrushenko, S.A., Afrov, A.M., Vasiliev, B.Yu., Generalov, V.N., Kosourov, K.B., Semchenkov, Yu.M., Ukrayintsev, V.F. NPPs with WVER-1000 Type Reactors: From the Physical Basics of Operation to Project Evolution. – Moscow: Logos, 2010. – 604 p (In Russ.).
  6. Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core. – 2009.
  7. Bulbul Ahammed D. A. A. S. From VVER-1000 to VVER-1200: Studying the impact of core changes. – 2024.
  8. Bergelson, B.R., Balyuk, S.A. Analysis of the Accumulation of Long-lived Radiotoxicity in the U–Pu Fuel Cycle of Nuclear Power // Atomic Energy. – 1996. – Vol. 80, No. 1. – P. 37–43 (In Russ.).
  9. Chechetkin, Yu.V., Yakshin, E.K., Eshcherkin, V.M. Treatment of Radioactive Gaseous Waste at NPPs. – Moscow: Energoatomizdat, 1986. – 152 p (In Russ.).
  10. Koptelov, E.I., Kotivets, G.I. Radiometry – Navy. – 1972. – 535 p (In Russ.).
  11. Kovbasenko, Yu.P. (2016). Comparative Analysis of the Isotopic Composition of Spent Nuclear Fuel of Westinghouse and TVEL Companies // Nuclear and Radiation Safety Journal (In Russ.).
  12. Korcheva, Yu.A. et al. Estimation of Activity Inventory for Major Radiologically Hazardous Radionuclides During Long-term Management of Spent Nuclear Fuel at Belarusian NPP // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of Physical-Technical Sciences. – 2020. – Vol. 65, No. 2. – P. 243–251 (In Russ.).  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

## **РАСЧЕТ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ В ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-1000 ПОСЛЕ ПЕРВОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА**

**Д. М. Секен\*, А. С. Сураев, Н. Е. Мухамедов, Р. А. Иркимбеков, О. М. Жанболатов**

***Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан***

*\* E-mail для контактов: [seken@nnc.kz](mailto:seken@nnc.kz)*

В работе представлено нейтронно-физическое моделирование накопления радионуклидов в реакторе ВВЭР-1000 после первого топливного цикла с использованием кода MCNP6 и библиотек ENDF/B-VII. Проведены расчёты по образованию основных долгоживущих продуктов деления ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$  и др.), актиноидов (Np, Pu, Am), благородных газов (Kr, Xe), а также аэрозольных и йодсодержащих радионуклидов. Особое внимание уделено оценке остаточной активности и влияния накопленных изотопов на радиационную безопасность. Исследование имеет прикладное значение для разработки стратегий обращения с ОЯТ и ТРО, проектирования хранилищ, оценки экологических рисков и развития атомной энергетики в Республике Казахстан.

**Ключевые слова:** *выгорание топлива, радионуклиды, актиноиды, отработанное ядерное топливо, твердые радиоактивные отходы, активность, радиационная безопасность, нейтронно-физические расчёты, MCNP.*

## CALCULATION OF RADIONUCLIDE ACCUMULATION IN A VVER-1000 FUEL ASSEMBLY AFTER THE FIRST FUEL CYCLE

**D. M. Seken**<sup>\*</sup>, A. S. Surayev, N. E. Mukhamedov, R. A. Irkimbekov, O. M. Zhanbolatov

*Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

*\* E-mail for contacts: [seken@nnc.kz](mailto:seken@nnc.kz)*

This study presents neutron-physical modeling of radionuclide accumulation in a VVER-1000 reactor after the first fuel cycle using the MCNP6 code and the ENDF/B-VII nuclear data libraries. Calculations were performed to determine the generation of major long-lived fission products ( $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{129}\text{I}$ , etc.), actinides (Np, Pu, Am), noble gases (Kr, Xe), as well as aerosol-forming and iodine-containing radionuclides. Special attention is given to the evaluation of residual activity, and the impact of accumulated isotopes on radiation safety. The findings are of practical importance for the development of spent nuclear fuel (SNF) management strategies, storage design, environmental risk assessment, and preparation for nuclear power plant construction in Kazakhstan.

**Keywords:** *fuel burnup, MCNP, radionuclides, actinides, spent nuclear fuel, activity, radiation safety, modeling, neutron-physical calculations.*