

О. БОРОВОЙ, В. БАР'ЯХТАР, В. КУХАР

УРОКИ ЧОРНОБИЛЯ: ПРОБЛЕМИ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

П'ятнадцять років тому аварія на Чорнобильській АЕС важким тягарем лягла на плечі мільйонів громадян України, Білорусі, Росії. Сотні тисяч людей узяти участь у роботах з ліквідації її наслідків. Хоч ці роботи ніколи не припинилися, вони, на жаль, ще дуже далекі від завершення.

Уроки Чорнобиля мають надзвичайно важливе значення для розвитку атомної енергетики, екології, медицини та цілого ряду інших галузей. Саме тому так важливо проаналізувати їх, зрозуміти своєчасність і дієвість масштабних заходів, які вживалися під час робіт з ліквідації наслідків аварії.

У цій публікації автори оцінюють деякі з тих заходів, зокрема аналізують усі обставини, пов'язані із спорудженням об'єкта «Укриття», що закрит зруйнований 4-й блок. Такий аналіз має принципово важливе значення. Сьогодні він став можливим, оскільки вже зібрано досить повну інформацію, яка дає змогу більш-менш ґрунтовно оцінити все здійснене за 15 постчорнобильських років. А це допоможе внести ясність у питання, відносно яких досі існує багато спекуляцій.

ЩО СКИДАЛИ У ШАХТУ РЕАКТОРА?

Внаслідок аварії на 4-му блоці ЧАЕС були знищені бар'єри та системи безпеки, які захищали навколишнє середовище від радіонуклідів, що містилися в опроміненому паливі. Викид активності із зруйнованого реактора на рівні мільйонів Кюрі на добу тривав протягом десяти днів — з 26 квітня по 6 травня 1986 р. (див. рис. 1 [1]). Згодом рівень викидів знизився у тисячі разів і надалі поступово зменшувався. В літературі цей проміжок часу одержав назву *активної стадії аварії*.

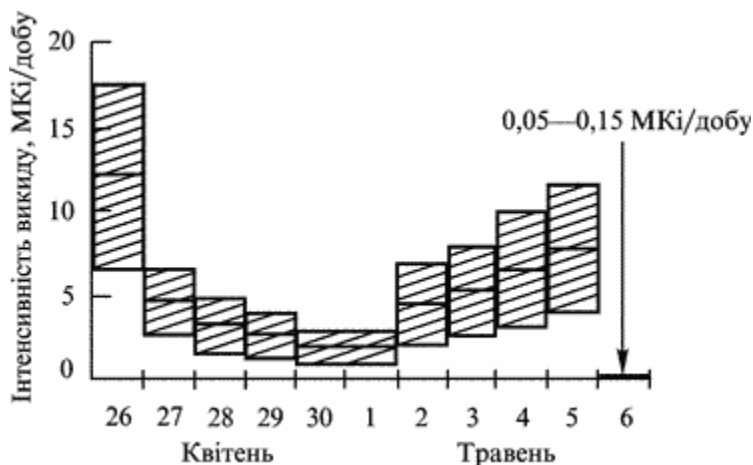


Рис. 1. Динаміка викиду на активній стадії аварії. Похибка вимірів $\pm 50\%$ (оцінка авторів [1]).

Урядова комісія, що почала працювати в Чорнобилі у другій половині дня 26 квітня, виділила три головні види загрози, які на той момент були пов'язані з ядерним паливом у зруйнованому реакторі, — ядерну небезпеку, теплову і радіаційну.

Ядерна небезпека. Головне побоювання викликав той факт, що у реакторі міг залишитися непошкодженим великий кластер уран-графітової кладки. Вже перші розрахунки, виконані до початку травня 1986 р. [2], показали, що за відсутності води і поглинаючих стрижнів може виникнути самопідтримувана ланцюгова реакція (СЛР). Згодом з'ясувалося, що в кластері, який має понад 154 канали (~1/10 частина кладки), також може виникнути СЛР, якщо з якихось причин у ньому немає поглинаючих стрижнів. Менш вірогідною, але все ж таки можливою, здавалася ситуація, за якої небезпечний фрагмент кладки під час вибуху міг потрапити у Центральну залу.

Теплова небезпека. Згідно з першим припущенням частина ядерного палива могла потрапити на нижню плиту реактора — схему «ОР». Теплова небезпека, або так званий китайський синдром (поширений вираз, запозичений з кінофільму з такою назвою), полягала в тому, що розжарене паливо могло поступово

пропалити схему «ОР» і далі — перекриття нижніх приміщень реакторного відділення. Крім того, радіоактивність могла потрапити у ґрунтові води та забруднити їх. Перші розрахунки таких процесів були зроблені в «Журчатовському інституті» і дали маловтішні результати — «синдром» міг стати реальністю.

Радіаційна небезпека була пов'язана передусім з тривалим безупинним викидом активності із зруйнованого реактора, переважно внаслідок горіння графіту.

На своєму першому засіданні (вночі з 26 на 27 квітня) Урядова комісія прийняла рішення скинути з вертольотів у відкриту шахту реактора різні матеріали для локалізації аварії. Частина з них (сполуки бору, зокрема В₄С) складалася з нейтронних поглиначів і мала забезпечити ядерну безпеку. Інші (глина, пісок, доломіт) призначалися для створення фільтруючого шару і зменшення радіаційного викиду. Крім того, доломіт СаМg[СО₃]₂, потрапляючи у зону високих температур, мав розкладатися та утворювати вуглекислий газ, що міг би забезпечити «газове перекриття» — «відібрати» у графіту кисень, який горів. Нарешті, свинець мав прийняти на себе тепло, що виділялося, розтопитися і запобігти розвитку «китайського синдрому».

Отже, під час активної стадії всі основні технічні заходи були націлені на локалізацію аварії, запобігання викиду радіоактивних речовин з реактора (див. табл. 1 [3]).

Таблиця 1. Основні заходи, вжиті під час активної стадії аварії.

Дата	Час	Опис подій і заходів
26 квітня	~ 01.00	Аварія. Руйнування реактора.
26 квітня	01.30— 06.30	Гасіння пожеж.
26 квітня	День	Відключено насоси, що подавали воду в реактор (нижні позначки всіх блоків затоплені радіоактивною водою).
26 квітня	Після 15:00	З'ясовуються справжні розміри аварії.
26 квітня	Ніч	На засіданні Урядової комісії вирішено: зупинити 1-й і 2-й блоки, перевести у підкритичний стан 3-й блок; евакуювати населення Прип'яті та сел. Янов; розпочати скидання у зруйнований реактор матеріалів для локалізації аварії.
27 квітня	~ 10.00	Початок скидання у реактор різних матеріалів (з вертольотів).
27 квітня	Ніч	Скидання карбиду бору.
1 травня	Протягом дня	Прийнято рішення розпочати охолодження реактора азотом, щоб запобігти появі «китайського синдрому».
2 травня	Надвечір	Скинуто приблизно 5000 т матеріалів.
3—4 травня	Протягом ночі	Співробітниками ЧАЕС відкрито засувки, щоб спустити радіоактивну воду з басейну-барботера 4-го блока.
5 травня		Змонтовано систему подачі азоту.
6 травня	~01.00	Прибуття першої машини з рідким азотом. Невдовзі газоподібний азот почав надходити на другий поверх басейну-барботера. Спроби охолодження успіху не мали.
Вівторок 6 травня		Інтенсивність викиду знизилася на три порядки. Кінець активної стадії.

Найважливіша операція — скидання матеріалів у шахту реактора.

Ще й досі тривають суперечки щодо того, наскільки необхідні були ці та інші терміново вжиті тоді заходи. Бо вже у 1990 р. стало ясно, що переважна більшість скинутих матеріалів не потрапила до шахти реактора [4]. Тому варто докладніше спинитися на цих подіях.

Спочатку — фактичні дані. Щодо кількості і складу матеріалів у літературі існує безліч розбіжностей, пов'язаних переважно з тим, що ці дані одержували з «третьох рук». Ми звернулися до першоджерела — записів у журналах оперативної групи Військово-повітряних сил Міністерства оборони [5]. Вони зведені у табл. 2 і проілюстровані на рис. 2 (для активної стадії аварії). Склад матеріалів наведено у табл. 3.

Таблиця 2. Активна стадія аварії (26 квітня—6 травня 1986 р.).

Дата	Кількість вильотів	Маса скинутих матеріалів (т)	Повна кількість матеріалів у блоці (т)
26 квітня	—	—	—

27 квітня	44	150	150
28 квітня	93	300	450
29 квітня	186	750	1200
30 квітня	?	1500	2700
1 травня	?	1900	4600
2 травня	?	420 (?)*	5020 (?)*
3 травня	0	—	—
4 травня	0	—	—
5 травня	0	—	—
6 травня	0	—	5020

* Існують незначні розбіжності.

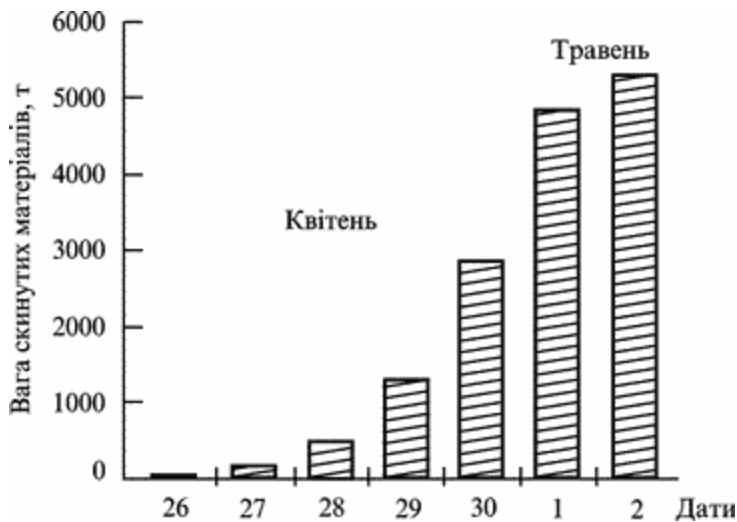


Рис. 2. Динаміка скидання матеріалів.

Таблиця 3. Характеристика скинутих у розвал реактора сухих і рідких матеріалів (на 18.06.86 р.).

Назва матеріалу	Хімічна формула	Маса (т)
Карбід бору	B_4C	~40
Доломіт	$CaMg[CO_3]_2$	~1200*
Мраморова крихта, глина, пісок тощо	—	~3500**
Свинець (дріб + «чушки» та інше)	Pb	~6700***
Тринатрійфосфат (розчин)	Na_3PO_4	~2500
Розчини (пиллопригнічуючі композиції)	Латекс марки СКС-65гп, барда, рідке скло, полівініловий спирт, каучук СКТН та інше.	~2700
Всього		~16600

* За час активної стадії скинуто ~600 т. ** За час активної стадії скинуто ~1800 т глини і піску. *** У перші 5 днів після аварії скинуто 2400 т свинцю. До 29.06.86 р. додатково скинуто 1890 т цеоліту.

До 18.05.86 р. кількість скинутих матеріалів залишалася на рівні ~ 5000 т. На 18.06.86 р. було скинуто вже ~ 11400 т сухих матеріалів (наша оцінка точності цих даних $\pm 20\%$).

ПЕРВИННА МОДЕЛЬ ПЕРЕБІГУ АКТИВНОЇ СТАДІЇ АВАРІЇ

Під час роботи з локалізації аварії та боротьби з викидом була створена перша модель, точніше — перший опис перебігу її активної стадії. Вона викладена у доповіді радянської делегації у МАГАТЕ [1]. У ній, зокрема, вказувалося: «На першій стадії аварії стався викид диспергованого палива із зруйнованого реактора.

Склад радіонуклідів у викиді на цій стадії приблизно відповідає їх складу в опроміненому паливі, але викид збагачений летючими нуклідами йоду, телуру, цезію, благородних газів.

На другій стадії (з 26 квітня по 2 травня 1986 р.) потужність викиду за межі аварійного блока зменшувалася завдяки заходам з припинення горіння графіту і фільтрації викиду.

Третя стадія характеризувалася швидким зростанням потужності виходу продуктів розщеплення за межі реакторного блока. Це зумовлювалося розігрівом палива в активній зоні до температур понад 1700°C за рахунок залишкового тепловиділення.

Для останньої, четвертої стадії, що настала після 6 травня, було характерним швидке зменшення викиду».

У наступних публікаціях ця модель описувалася докладніше. Перебіг процесів у зруйнованому реакторі пояснювався впливом скинутих матеріалів. Спершу, на думку авторів, сталося охолодження — свинець прийняв на себе частину тепла, що виділялося. Згодом, внаслідок скидання у шахту реактора сипких матеріалів, викид зменшився і одночасно через зменшення відведення тепла повітряним потоком зросла температура. Наприкінці активної стадії стався нібито прорив радіоактивності, спостерігалось зростання викиду, а після цього — різке його падіння. Здавалося, що динаміка викиду, викладена вище, повністю пояснює реальну картину (рис.1).

КУДИ ПОТРАПИЛИ СКИНУТІ МАТЕРІАЛИ ?

Дослідження 1987—1989 рр., що проводилися всередині об'єкта «Укриття», показали, що основне припущення, на якому будувалася модель 1986 р., — нібито скинуті матеріали потрапили до шахти реактора та засипали її товстим шаром, — не відповідало дійсності. Ознаки цього помітили ще в 1986 р. Так, на фотографіях Центральної зали було видно, що вона буквально засипана скинутими матеріалами, які утворили тут багатометрові пагорби [6] (рис. 3). Пізніше це підтвердили розвідувальні групи, які дісталися ЦЗ після тривалої підготовки. Втім, це не виключає того, що якась частина матеріалів потрапила в отвір шахти реактора.

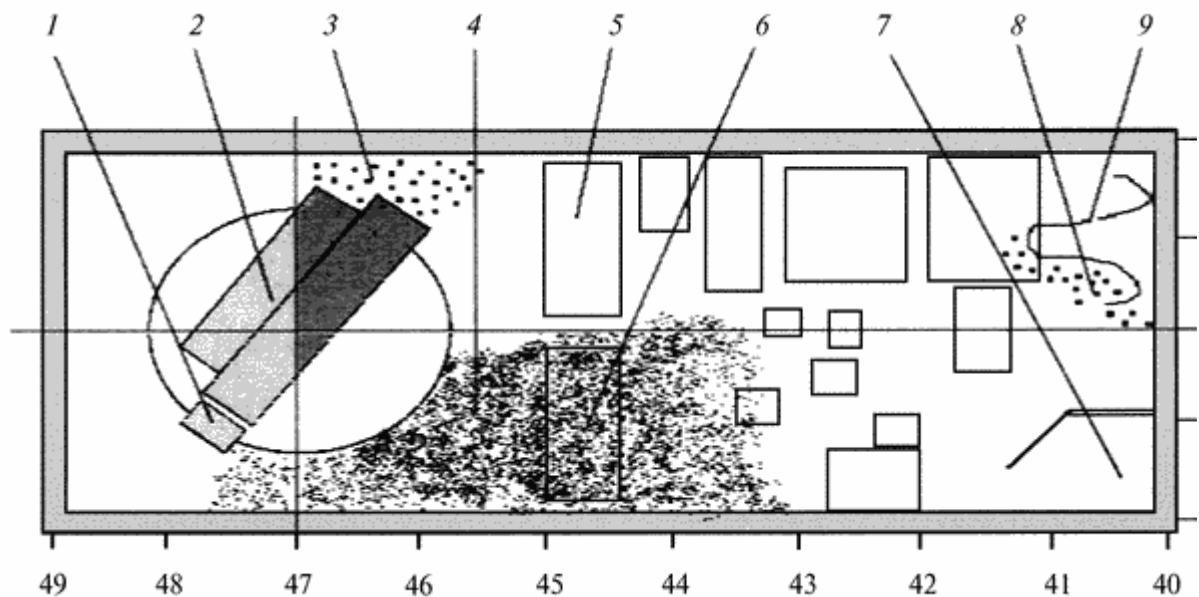


Рис. 3. Центральна зала 4-го блока після аварії (схема). 1 — залізобетонна плита; 2 — металоконструкція схеми «Е»; 3 — труби нижніх водяних комунікацій; 4 — завал з матеріалів, скинутих з вертольотів; 5 — північний басейн витримки; 6 — південний басейн витримки; 7 — пульта; 8 — фрагменти активної зони; 9 — частина металоконструкції схеми «КЖ».

У середині 1988 р. дослідникам пощастило побачити за допомогою оптичних приладів і телекамер те, що містилося всередині самої шахти. Скинутих матеріалів вони там практично не виявили. Але і це можна пояснити: матеріали потрапляли у зони високих температур, розплавлювалися і розтікалися по нижніх приміщеннях реактора. І справді, на нижніх поверхнях виявили великі маси застиглої, лавоподібної речовини, що містила ядерне паливо.

Індикатором того, що до складу лави ввійшли не тільки матеріали реактора, а й ті, що були скинуті з вертольотів, міг стати свинець. **Але свинцю у реакторі і навколо нього не виявили, хоча скинули його тисячі тонн.**

У табл. 4 наведені дані про вміст свинцю у різних типах лавоподібних паливовмісних мас.

Таблиця 4. Вміст свинцю у зразках лавоподібних паливовмісних мас (ЛПВМ).

Тип ЛПВМ	Вугільно-чорна кераміка	Шоколадно-коричнева кераміка	Шлак з куп ББ	Пемза з ББ
Pb (ваг. %)	$(6,5—110) \times 10^{-3}$	$(12—240) \times 10^{-3}$	$(1,1 \pm 0,1) \times 10^{-2}$	$(1,2 \pm 0,2) \times 10^{-2}$

Якщо загальна вага ЛПВМ оцінюється зараз майже у 1200 т, то інтегральна кількість свинцю в лаві — не більше як у 3 т з майже 7 тис. т, скинутих з вертольотів (це $\sim 5 \times 10^{-4}$ частина). Отже, свинець у шахту практично не потрапив. Тому й інші компоненти засипки, якщо і влучили туди, то в такій кількості, яка не вплинула вирішальним чином на поведінку викиду.

Такі нові факти.

Що ж завадило льотчикам виконати завдання? Мабуть, небезпека зіткнення з 150-метровою трубою, стовп диму, який ніс і величезну радіоактивність. Істотною причиною могло стати і те, що викинута вибухом схема «Е» стала майже вертикально разом з плетивом труб, котрі вона витягла за собою. Внаслідок цього утворився нібито щит, який відкидав до Центральної зали матеріали, що падали згори. У цей час поруч з шахтою реактора в Центральній залі світилася яскрава пляма (розжарений графіт?). На рис.3 вона позначена цифрою 4. Цю пляму цілком можна було прийняти за отвір шахти і скинути туди вантаж. Принаймні фахівці докладно обговорюють таку можливість [3].

СУЧАСНИЙ ПОГЛЯД НА МОДЕЛЬ ПЕРЕБІГУ АКТИВНОЇ СТАДІЇ АВАРІЇ

Повна модель перебігу активної стадії аварії має описувати три види процесів: механічні (які спричинили розподіл матеріалів у шахті реактора та підреакторних приміщеннях); хімічні (взаємодія речовин, що відбувалася під час активної стадії аварії і призвела, зокрема, до утворення лави); енергетичні (теплові) процеси (які викликали появу джерел тепла і динаміку теплопереносу в зруйнованому реакторі).

Повна модель поки що не створена, хоча помітні успіхи в описі всіх перелічених процесів є [7,8]. Не вдаючись у деталі побудови моделі, зазначимо тільки, що в ній відповідно до фактичних даних — спостережень, вимірювань, аналізів сотень зразків паливовмісних і конструкційних матеріалів — описані основні механічні, хімічні та теплові процеси, що відбувалися після аварії у зруйнованому реакторі.

Для опису в моделі утворення $\sim 1200 \text{ м}^3$ лави з тим хімічним складом, який нам сьогодні відомий, не було необхідності залучати значну кількість скинутих матеріалів. Залишкового виділення тепла паливом (з доданням невеликої кількості енергії від горіння графіту і окиснення цирконію) досить для пояснення процесів утворення лави та її розтікання підреакторними приміщеннями. Час перебігу процесів — аж до охолодження поверхні лави до температур нижче 700°C — 800°C і припинення викиду — оцінюється в кілька діб. Точність такої оцінки невисока, оскільки для точності потрібне детальне знання процесів теплопереносу на кожному етапі переміщення лави. Але все-таки одержані величини близькі до часу перебігу активної стадії аварії.

Тепер ми з більшою вірогідністю можемо припустити, що час закінчення активної стадії аварії залежав не від того, що в реактор скидали різні матеріали, а від складних фізичних і хімічних процесів утворення, розтікання та охолодження лави.

Оцінюючи заходи щодо закидання розвалу реактора матеріалами, слід чітко розуміти: на час прийняття такого рішення інформації про стан реактора та ядерного палива, що містилося в ньому, практично не було. До того ж мільйони Кюрі радіоактивності щоденно викидалися у навколишнє середовище, і часу для вагань не залишалось, потрібні були кардинальні і швидкі контрзаходи.

Знадобилися роки напруженої праці, щоб зібрати і осмислити факти, наведені вище. У травні 1986 р. ніхто не міг знати всі ці деталі.

Отже, незважаючи на справді героїчні зусилля пілотів, закидати реактор їм не вдалося. Та чи були вжиті заходи марними? Нам хотілося б привернути увагу до позитивних результатів цих заходів (нагадаємо, що йдеться тільки про технічний бік проблеми). Матеріали, які містили бор, потрапивши до Центральної зали, куди у момент вибуху були викинуті численні фрагменти активної зони реактора і паливний пил, накрили паливо і тим самим зменшили ядерну небезпеку (найімовірніше, взагалі зробили паливо ядерно-безпечним). Пісок, глина, доломіт у багатьох місцях товстим шаром накрили радіоактивні уламки і полегшили надалі роботу будівельників «Укриття», оперативного персоналу і дослідників. А незначна частина матеріалів усе ж могла потрапити до шахти і взяти участь в утворенні лави.

Ми так детально проаналізували першу стадію аварії, тому що саме її перебіг та вжиті заходи визначили фізико-хімічні характеристики і розподіл радіоактивних матеріалів у зруйнованому блоці, над яким було

споруджено «Укриття». Розуміння цього, як і подальшої поведінки матеріалів, має винятково важливе значення для стратегії поводження з радіоактивними відходами (РАВ) об'єкта «Укриття», для прийняття обґрунтованого рішення щодо його долі.

ОБ'ЄКТ «УКРИТТЯ»

Ідея створення об'єкта «Укриття», який мав закрити зруйнований блок, одразу викликала гарячі дискусії, що тривають і досі. Спершу розглядалося 18 проектів захисної споруди. Їх можна умовно поділити на дві групи. До першої — належать ті, де пропонувалося навколо четвертого блока звести повністю незалежну герметичну будівлю величезних розмірів або арку з просвітом 230 м, або купол з просвітом до 120 м. (До речі, через кілька років, коли на міжнародному конкурсі обговорювалися проекти «Укриття-2», ідеї, що висувалися, нагадували ті перші пропозиції.).

Друга група проектів для створення захисної оболонки пропонувала максимально використати стіни, що збереглися, та інші конструкції зруйнованого блока. На ці конструкції мали спиратися нові стіни і дах.

Попередні оцінки і техніко-економічні розрахунки показали, що роботи з втілення першого варіанта триватимуть 1,5—2 роки і потребуватимуть величезних витрат. Тим часом другий проект можна було реалізувати за кілька місяців і за істотно менших витрат.

Обрали другий варіант. **Проектування і будівництво «Укриття» були закінчені за 6 місяців. Це безпрецедентний у світовій практиці термін такого масштабного будівництва.** Але проект мав серйозні вади. Йдеться передусім про: відсутність будь-якої інформації про міцність старих конструкцій, на які спиралися нові, необхідність застосовувати дистанційні методи бетонування, неможливість у деяких випадках використати зварювання тощо. Всі труднощі виникали через величезні радіаційні поля поблизу зруйнованого блока. Вони ж, врешті-решт, стали причиною двох істотних недоліків конструкції. Перший — невизначеність міцності опор, які підтримують основні, несучі балки «Укриття». Другий — негерметичність конструкції (загальна площа щілин на даху і стінах об'єкта після завершення будівництва становила ~ 1000 м²).

Незважаючи на додаткові роботи задля зміцнення конструкцій «Укриття», вже у 1989 р. стало ясно, що воно не може вважатися об'єктом, безпека якого гарантована на десятки років. З'явилася пропозиція про створення «Укриття-2» [9]. На наукових конференціях та в широкій пресі почали висловлювати свої думки, що будівництво першого об'єкта було марним, а з урахуванням гігантських дозових і фінансових витрат — навіть шкідливим заходом. Мовляв, не треба було нічого робити, а зачекати 10—20 років, розробляючи техніку і технологію, а згодом розібрати 4-й блок і поховати паливо. Висловлювалась і прямо протилежна думка: що слід було одразу побудувати величезну, абсолютно герметичну і безпечну споруду, тобто реалізувати перший варіант.

Чи була обґрунтованою ця критика?

Після аварії 4-й блок перетворився на відкрите джерело радіонуклідів величезної активності. На поверхню розвалу реактора, на зруйновані конструкції, дах, на зовнішню поверхню будівель і майданчик навколо блока потрапило безліч викинутих фрагментів активної зони та паливного пилу. Згідно з пізнішими оцінками тільки на поверхні розвалу зосередилося 5—10 т паливного пилу [10; 11; 12]. Через десять днів після аварії його активність становила ~50 мільйонів Кюрі. З відкритого джерела такої потужності вітер швидко розніс би високоактивну речовину на далеку відстань. Тоді ні про який пуск 1-го, 2-го і тим більше 3-го блока не могло бути і мови.

Щорічно на територію ЧАЕС випадає близько 600 мм опадів. Ця вода просочується крізь матеріали відкритого джерела і, перетворившись на радіоактивну, рано чи пізно має потрапити у ґрунт. За дуже приблизними оцінками, це ~ 10 тисяч кубометрів води на рік. Про будь-яке керування цими водними потоками годі й говорити.

Спорудження «Укриття» поставило бар'єри для вторинної міграції радіонуклідів та інтенсивного забруднення навколишнього середовища, дало змогу здійснити роботи з відновлення діяльності ЧАЕС і знизити дозові навантаження на людей, які працювали на станції та в Зоні. Можна наводити ще додаткові аргументи, які доводять необхідність максимально швидкого спорудження «Укриття».

Поглянемо тепер на проблему з іншого боку й оцінімо, наскільки успішно ця споруда виконувала свої завдання за минулі 15 років.

ВПЛИВ «УКРИТТЯ» НА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Головна мета створення «Укриття» — обмежити вплив зруйнованого блока на навколишнє середовище, зробити так, щоб вихід радіоактивних речовин за межі об'єкта не перевищував допустимих норм. Тому контроль за станом «Укриття» включає в себе вимірювання цілого ряду параметрів:

- максимальної експозиційної дози гамма-випромінювання на території промайданчика;
- об'ємної активності альфа- і бета-аерозолів у повітрі на майданчику (за допомогою аспіраційних іонних установок);
- активності газо-аерозольних викидів в атмосферу через «байпас» витяжної вентсистеми об'єкта «Укриття»;
- об'ємної активності та радіонуклідного складу ґрунтових вод на майданчику;
- виносу активних аерозолів через нещільності в даху об'єкта.

Вимірювання цих параметрів протягом ~ 12 років свідчить про те, що «Укриття» не справляє значного негативного впливу на навколишнє середовище. Це підтверджує хоча б динаміка забруднення повітря альфа-аерозолями на його майданчику протягом 1989—2000 років (рис. 4). З 1990 р. їх концентрація не перевищує допустимого рівня. Вона істотно зменшилася після початку роботи системи пилопригнічення, встановленої під дахом «Укриття» у Центральній залі. В останні роки концентрація трохи зросла внаслідок розгортання робіт навколо об'єкта, але залишається значно нижчою за допустиму.

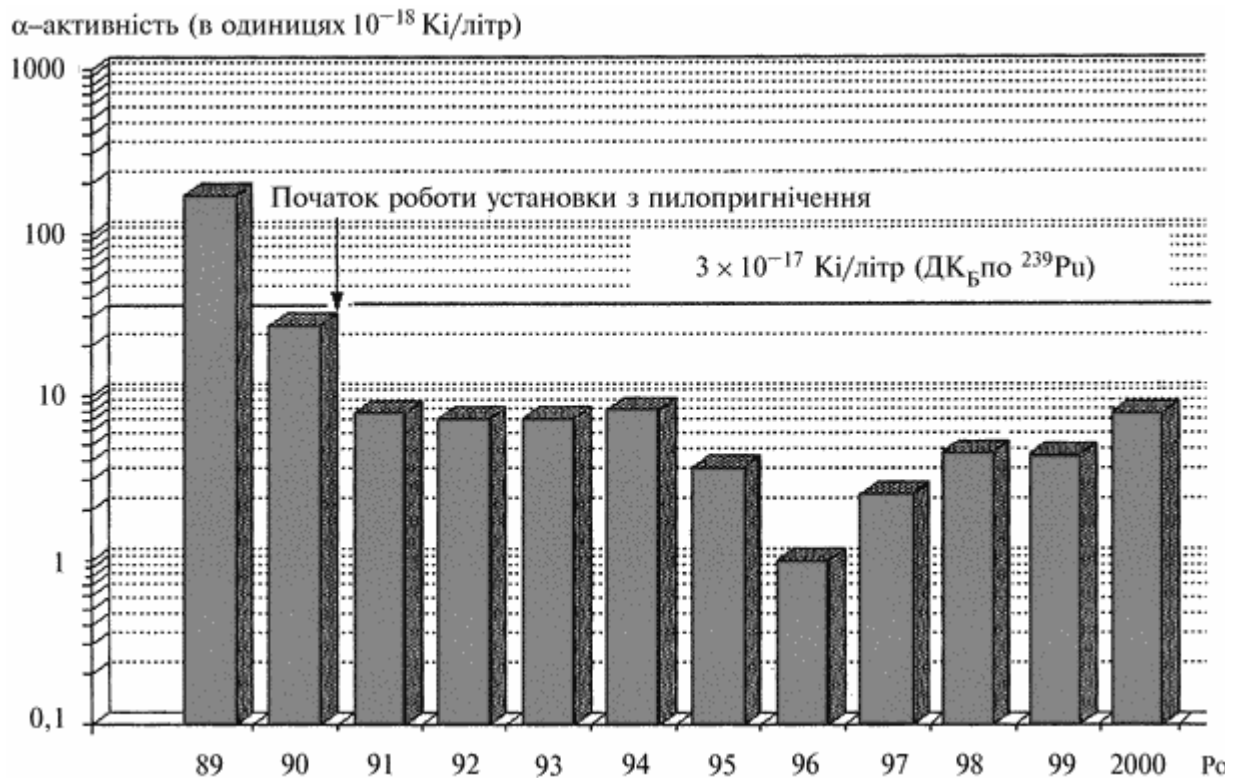


Рис. 4. Забруднення повітря альфа-аерозолями на майданчику «Укриття».

Велику стурбованість викликала можливість потрапляння у ґрунт високоактивної води. Як уже говорилось, «Укриття» не є герметичним об'єктом. Завдяки роботам з його герметизації, проведеним в останні роки, площа щілин значно зменшилась, але вода під час опадів усе ще проникає всередину споруди. Шляхи її переміщення і накопичення детально досліджувались у МНТЦ «Укриття». Останні дані свідчать, що основна частина блочних вод перетікає на 3-й блок і разом з його водою надходить на переробку [13]. Друге джерело вологи — її конденсація всередині об'єкта внаслідок коливань температури та вологості повітря. Величина похибок, наявних як в оцінках надходження води в об'єкт, так і в замірах її витоку, велика. Отже, існує можливість інших, поки що неконтрольованих витоків води за межі реакторного блока. Однак їх не може бути багато.

Можна сказати, що весь час «Укриття» виконувало ті завдання, заради вирішення яких воно створювалось. Адже велася постійна робота з дослідження, моніторингу і технічного обслуговування об'єкта. Реалізувалися і досить масштабні заходи з підвищення його безпеки. Зокрема, зміцнювалися будівельні конструкції машзали і деаераторної етажерки; створювалися системи пилопригнічення; здійснювались операції для герметизації об'єкта; відкачувалась вода з нижніх приміщень машинної зали; зміцнювалась вентиляційна труба 3-го і 4-го блоків тощо.

На жаль, всі ці заходи не могли гарантувати безпечного стану об'єкта навіть у найближчі роки. Тому з 1998 р.

за підтримки світової спільноти розпочалися роботи з кардинального перетворення «Укриття». Очевидно, основним їх етапом буде зведення «Укриття-2». Отже, може реалізуватися перший варіант будівництва об'єкта, який обговорювався ще в 1986 р.

Головна концепція SIP (плану здійснення заходів), прийнята в 1998 р., передбачає створення нової оболонки для зруйнованого 4-го блока ЧАЕС, яка гарантувала б його безпеку для навколишнього середовища щонайменше на 100 років, і розробку стратегії вилучення палива, радіоактивних матеріалів та контрольованого їх поховання згідно з існуючими нормами. Обидва завдання винятково складні, масштабні і не мають аналогів у світовій практиці. Ускладнюються вони ще й через численні невизначеності, які досі існують і які не вдається усунути через існування високих радіаційних полів і брак знань. Одним з таких «дефіцитів знань» є проблема палива, що залишилось у блоці.

ПОШУКИ ПАЛИВА В «УКРИТТІ»

Протягом 15 років було кілька етапів вивчення паливовмісних мас. **На першому з них (1986—1987 рр.)**, завдяки дослідженням розподілу радіоактивних опадів на різних територіях, вдалося визначити інтегральну кількість палива, що залишилося в «Укритті». За підрахунками, його мало залишитися понад 95 % від первинного завантаження реактора 4-го блока.

Були визначені й основні модифікації паливовмісних мас (ПВМ) — фрагменти активної зони, паливний пил, лавоподібні ПВМ, уран і трансуранові елементи, які містяться у воді, накопиченій в «Укритті».

Другий етап (1988—1991 рр.) — час найінтенсивнішого призбирування інформації. Дослідження ведуться розвідницькими групами за допомогою свердловин. Наслідком цього етапу може вважатися документ «Технічне обґрунтування ядерної безпеки об'єкта «Укриття» (ТОЯБ), де наводяться перші оцінки розподілу ПВМ у приміщеннях «Укриття». Зроблені вони були на підставі візуальних спостережень, теплових досліджень і аналізу близько 100 проб. Загальну кількість палива, яке на цей час осіло у приміщеннях реактора, було оцінено у 135 ± 30 т. Інші ПВМ залишались недоступними для оцінки.

На третьому етапі (1992—1996 рр.) буріння свердловин всередині об'єкта практично припинено. Однак триває робота розвідницьких груп та накопичується інформація, що надходить від систем контролю і діагностики ПВМ. Проводяться аналізи проб. Пропонуються нові методи оцінки кількості лави у нижніх приміщеннях — за викидом радіоактивного цезію та хімічним складом лави. Ряд об'єктивних і суб'єктивних причин (охолодження ПВМ та їх руйнування, виявлення нових композицій палива та інше) змушують повернутися до питань ядерної безпеки «Укриття» і переглянути їх.

Інформація про ПВМ підсумована у документі «Аналіз поточної безпеки об'єкта «Укриття» і прогнози оцінки розвитку ситуації» [6].

Четвертий етап (1996—2001 рр.) — це розгортання широкого фронту робіт з перетворення «Укриття». Потрібно не тільки одержати нову інформацію, а й прискіпливіше і цілеспрямованіше проаналізувати всі дані щодо ПВМ. Тому одночасно з обстеженням верхніх і підреакторних приміщень «Укриття» виконується багато аналітичних і розрахункових досліджень, проводиться верифікація аналізів понад 300 проб та даних систем контролю за 15 років. Основне завдання дослідників — від загального опису ПВМ об'єкта перейти до аналізу стану конкретних приміщень і, головне, дослідити скупчення палива у них, точніше оцінити їх радіаційну та ядерну небезпеку.

З'ясуємо ж, що зараз відомо про паливо в «Укритті» і наскільки точною є ця інформація.

Як уже говорилося, на підставі даних про викид можна стверджувати, що понад 95 %, тобто більше 180 т, опроміненого палива із зруйнованої активної зони реактора міститься в об'єкті «Укриття» [14]. Відшукати всі 180 т поки що не вдалося. Дослідники не змогли дістатися до деяких місць в об'єкті, де можуть концентруватися значні маси палива. Йдеться про завал у Центральній залі, каскадну стіну та інші приміщення. Але більшість скупчень ПВМ вивчено.

Повернемося до останніх оцінок, зроблених експертами під час створення бази даних «Стан паливовмісних мас і радіоактивних речовин об'єкта «Укриття» Чорнобильської АЕС» (у рамках франко-німецької ініціативи) [15]. Ці оцінки наведено у табл. 5, в 4-й колонці. В 3-й колонці даються розрахунки, використані у роботі «Аналіз поточної безпеки об'єкта «Укриття» і прогнози оцінки розвитку ситуації» [6]. Видно, що ці дані добре узгоджуються.

Таблиця 5. Оцінки кількості палива у приміщеннях об'єкта «Укриття»

Назва приміщень, №№	Модифікації ПВМ у приміщенні	Знайдене паливо (в т U)		Примітки
		<Аналіз> 01.01.1996	Експертні оцінки на 01.06. 2000	

Центральна зала (914/2)	Фрагменти активної зони	(10-30) + 5,5	Понад 21	З урахуванням 48 збірок зі свіжим паливом (5,5 т). Можлива наявність ЛПВМ
Південний басейн витримки	Фрагменти активної зони	14,8	14,8	129 касет з відпрацьованим паливом. Можлива наявність ЛПВМ
Усі верхні приміщення, включаючи ЦЗ (відм. 24 м і вище)	Паливний пил	~30 в ЦЗ	~ 5 на поверхні завалу в ЦЗ, ~ 30 всього	Оцінка 30 т включає пил на поверхні і всередині завалу в ЦЗ та пил в усіх інших приміщеннях
304/3	ЛПВМ	11 ± 5	6 ± 2	«Горизонтальний потік лави». Враховані ПВМ у проломі між прим.304/3 і 305/2
301/5 + 301/6 + 303/3	ЛПВМ		4,5 ± 2,5	«Горизонтальний потік лави»
217/2	ЛПВМ		0,4 ± 0,2	«Слонова нога», «сталактити». ЛТСМ потрапили з «горизонтального потоку»
Підапаратні 305/2 і 504/2 до відм. 24 м	Фрагменти АЗ, ЛПВМ, пил	Понад 60	85 ± 25	Розрахунки велися на підставі даних про 6 скупчень ПВМ. Початок усіх потоків ЛПВМ
ПРК (210/5 + 210/6 + 210/7)	ЛПВМ	25 ± 11	12 ± 6	«Великий вертикальний потік» і «малий вертикальний потік»
ББ-2 (012/14 + 012/15+012/16)	ЛПВМ	8 ± 3	Мінімум — 3, максимум — 14	
ББ-1 (012/5 + 012/6 + 012/7)	ЛПВМ	1,5 ± 0,7	1,9 (+1,0,— - 0,5)	
Вода в усіх приміщеннях реакторного відділення	Розчинені солі U, суспензія	~ 3кг	~ 4кг	
Паливо на майданчику «Укриття»	Фрагменти АЗ, пил	0,6 (+0,3; - 0,2)	0,75 ± 0,25	

Максимально обережна експертна оцінка така: у приміщеннях об'єкта «Укриття» знайдено понад 125 т палива із зруйнованого реактора, 5,5 т — свіжого (в ЦЗ) і ~15 т опроміненого з південного басейну витримки.

«УКРИТТЯ» І ПРОБЛЕМИ БЕЗПЕКИ

Процес дослідження палива в «Укритті» потребував багато часу, а також був пов'язаний з ризиком одержати велику дозу опромінення і значними фінансовими витратами. Щоб оцінити ефективність цих досліджень (з технічної точки зору), необхідно зрозуміти, як така інформація допомагає у роботі з визначення поточної безпеки та створення проектів перебудови об'єкта. Наведемо як приклад ситуацію з ядерною безпекою.

Тут виникають різні запитання. Найголовніше з них — чи справді «Укриття» є *ядерно-небезпечним об'єктом і чи може за якихось реальних обставин виникнути критичність в одному із скупчень ПВМ?*

Нагадаємо, що відповідь на це запитання була різною протягом всього періоду існування «Укриття» і проведення робіт з пошуку і вивчення стану палива. Так, «Технічне обґрунтування ядерної безпеки «Укриття», видане у 1990 р., давало заперечну відповідь на це запитання, але звертало увагу і на тенденції, які можуть знизити ядерну безпечність об'єкта.

На жаль, прогнози підтвердилися. Вивчення скупчень ПВМ, яке постійно триває, показало, що цілий ряд об'єктивних і суб'єктивних причин змушує переглянути ситуацію з ядерною безпекою. Зокрема, дослідження зразків паливовмісної лави з підапаратного приміщення 305/2, виконані в 1992— 1993 рр., показали наявність у деяких з них фрагментів активної зони (АЗФ) у нерозплавленому стані. Крім того, під час візуальних спостережень були зареєстровані фрагменти активної зони, які перебувають у безпосередньому контакті з лавою. Таким чином, стало ясно, що при розрахунках і оцінках ядерної безпеки необхідно враховувати нову композицію — «лава + АЗФ + вода», у багатьох випадках небезпечнішу, ніж композиція «лава + вода».

Водночас стан деяких бар'єрів безпеки, які перешкоджали розвитку самопідтримуваної ланцюгової реакції, з часом істотно погіршився. Скажімо, якщо раніше надходженню води у лавоподібні ПВМ перешкоджали висока температура і водонепроникність самої речовини, то тепер ситуація змінилася. Сталося охолодження

лави, її розтріскування і перетворення на структуру, в яку проникає вода.

Внаслідок охолодження палива в «Укритті» і зниження потужності техногенних джерел тепла кількість конденсаційної води, що утворюється на холодних поверхнях у приміщеннях об'єкта, в останні роки істотно зросла. Ця вода вже не просочується крізь матеріали, скинуті в Центральну залу (як, наприклад, дощова), і не містить елементів, які поглинають нейтрони.

Крім того, останні дослідження за допомогою трасерів показали, що в умовах «Укриття» і дощова вода досить швидко втрачає нейтронно-поглинаючі добавки. Долаючи шар із піску, уламків бетону та інших будівельних конструкцій, вона втрачає розчинені солі гадолінію і бору.

Як відомо, тепер висновки ТОЯБ істотно змінені. Сьогодні констатується, що наші знання про скупчення ПВМ ще недостатні для того, щоб розрахунковим або експериментальним шляхом з'ясувати вірогідність виникнення самопідтримуваної ланцюгової реакції, наприклад у випадку заливання водою. Відповіддю на запитання щодо небезпечності «Укриття» може бути висновок: «Для приміщень, про які немає достатньої інформації, в разі певних вихідних подій не можна виключити можливість зростання критичності ПВМ. До таких приміщень належать Центральна зала, шахта реактора і підпаратне приміщення 305/2, в якому зосереджена основна маса паливної «лави». *Все це означає, що зараз об'єкт «Укриття» не можна вважати ядерно-безпечним*» [6].

Якщо безпека появи критичності ПВМ існує, і ми не в змозі довести, що її вірогідність мала, то яку загрозу вона становить для персоналу і навколишнього середовища? Якщо ризик надто великий, то які превентивні заходи треба здійснити для його зниження на час стабілізації ситуації (приблизно 20 років) і при проведенні робіт на «Укритті»? Як постійно контролювати критичність?

Розгляд цих питань виходить за рамки даної статті, але відповідь на кожне з них потребує детальної інформації про паливо, що залишилося в «Укритті».

Ми глибоко переконані, що робота, пов'язана з вивченням уроків Чорнобиля, має проводитися постійно. Критичний розгляд численних заходів у період ліквідації аварії на ЧАЕС є необхідним для створення, можливо, спеціальної бази даних з цього питання. Адже аналіз ефективності всього, що було зроблено, сприятиме накопиченню знань і досвіду, які можуть стати у пригоді у разі виникнення найрізноманітніших аварійних ситуацій техногенного та природного походження. Тільки спираючись на попередній досвід і знання, можна приймати ефективні рішення у складних обставинах, що потребують термінових дій.

1. *USSR State Committee on the Utilisation of Atomic Energy «The Accident at the Chernobyl NPP and its Consequences» // IAEA Post Accident Review Meeting, Vienna, 25—29 August 1986.*
2. *Бурлаков Е. В., Занков Ю. Н., Кватор В. М. О возможности возникновения СЦР после аварии (Докладная записка руководству ИАЭ им. И. В. Курчатова, рукопись).— Москва, 07.05.86.— С. 5.*
3. *A. R. Sich. Chernobyl Accident Management Actions // Nuclear Safety. — Vol.35.— N1. January—June 1994.— P.1—22.*
4. *Borovoi A. A. Analytical Report (Post- Accident Management of Destroyed Fuel from Chernobyl) // IAEA, Work Material.— 1990.— P. 1—99.*
5. *Проведение работ по засыпке реактора и пылеподавлению на бывшем 4-м энергоблоке ЧАЭС и прилегающей к нему территории. (Акт 09/05—93 от 16.09. 96. Отв. исполнитель Симановская И. Я.).*
6. *Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации (Отчет МНТЦ «Укрытие», выполненный по соглашению №3, по теме №4 генерального договора №1/95 между ПО ЧАЭС и МНТЦ «Укрытие». Ответственный исполнитель А. Боровой).— Чернобыль, 1996.арх. №3601.— 272 с.*
7. *Пазухин Э. М. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования // Радиохимия.—1994.— Т. 36.— Вып. 2, 1994, С. 97—142.*
8. *Богатов С. А. Взаимодействие аварийного топлива 4-го энергоблока ЧАЭС с конструкционными материалами — количественные оценки // Объект «Укрытие» — 10 лет, основные результаты научных исследований.— Чернобыль, 1996.—С. 112—127.*
9. *Беляев С. Т., Боровой А. А. Отчет КЭ при ИАЭ им.И. В.Курчатова N57—05/110 от 29.09.89.— Чернобыль.— 5 с.*
10. *Расчетно-аналитические оценки по общему распределению топливных масс в «Укрытии» и предложения*

по дальнейшему проведению работ по долговременному захоронению топлива. Часть I. Проведение расчетно-аналитических оценок расположения ТСМ на верхних отметках разрушенного блока. Отчет ИАЭ им.И. В.Курчатова—Инв. № 50.05/69 от 29.10.91.

11. Душин В. Н., Петров Б. Ф., Плескачевский Л. А. и др. Локализация источников интенсивного гамма-излучения и оценка количества топлива в Центральном зале 4-го энергоблока ЧАЭС. — Чернобыль, 1992.— Инв. № 1732 И.

12. Usatyj A. F. Generalized results of determination of distributions of major gamma radiation sources in the central hall of the Sarcophagus, recorded by dosimetric cords using EPR sensors//Sarcophagus Safety'94. (The State of Chernobyl Nuclear Power Plant Unit 4. Proceedings of an International Symposium. Zeleny Mys, Ukraine, 14—18 March 1994). — P. 185—195.

13. *Контроль* накопления радионуклидов и топлива в воде разных помещений объекта «Укриття» (Отчет ОЯРБ МНТЦ «Укриття»).—Чернобыль.— Инв. № 3789. —39 с.

14. *Боровой А. А.* Выброс ядерного топлива и продуктов деления из реактора 4-го блока ЧАЭС при аварии. Обзор (Препринт МНТЦ «Укриття»), 2000.

15 *Проект 1:* «Состояние безопасности объекта «Укриття» Чернобыльской АЭС». Подпроект 3: «Ядерное топливо и радиоактивные отходы» по специальному соглашению с IPSN и GRS от 23 апреля 1998 г.» (Рабочий отчет ИВТЭМ РНЦ «Курчатовский институт» от 30.04.99 г.—75 с; от 30.10.99 г.—102 с; от 30.04.2000 г.— 42 с.) Ответственный исполнитель — Боровой А. А.

© *БОРОВОЙ* Олександр Олександрович. Доктор фізико-математичних наук. Керівник відділу ядерної безпеки МНТЦ «Укриття».

БАР'ЯХТАР Віктор Григорович. Академік НАН України. Директор Інституту магнетизму НАН і Міністерства освіти і науки України.

КУХАР Валерій Павлович. Академік НАН України. Директор Інституту біоорганічної хімії та нафтохімії НАНУ (Київ). 2001.

[Попередня стаття](#)

[Зміст](#)

[Наступна стаття](#)