

ЯДЕРНИЙ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИЙ БАФТИНГ, ФЛАТТЕР ТА КОЛАПС В ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМАХ: ПСЕВДООПЕРАТИВНА ВИХОР-ХВИЛЬОВА ДИНАМІКА І ТОПОЛОГІЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ТА САЯНО-ШУШЕНСЬКОЇ КАТАСТРОФ

Встановлені фізичні механізми Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Формальною причиною Чорнобильської катастрофи стала безглуздість затвердженої програми експерименту з вибігу турбогенератора, яка не передбачала керованих механізмів утилізації надлишкової внутрішньої енергії теплоносія після відсічення турбіни від парового потоку. Саме ця енергія дала початок формуванню некерованої вихор-хвильової структури гідродинамічного поля швидкостей, яка в подальшому каскадно підсилювалась і топологічно трансформувалась з під'єднанням відповідних структур сильного та слабого полів. В перші ж секунди після закриття стопорно-регулюючих клапанів турбіни розвинувся решітчастий флаттер твелів та експлуатаційно зношених збірок в технологічних каналах реактора, який за 10–20 секунд переріс у сильно виражений бафтинг. Це сприяло подрібненню ядерного палива у твелах та переходу гальмуючого ізотопу ксенону-135 (попередньо накопиченого у т.з. йодній ямі) із ядерного палива в газову фазу. Цей фактор у поєднанні з кавітаційним сповільненням нейтронів у вихор-хвильовому полі швидкостей сприяв аварійному розгону реактора на ультрахолодних нейтронах, які не реєструвались наявними системами контролю потужності реактора, розрахованими на теплові нейтрони з відносно великою довжиною вільного пробігу. Ліва частина енергії поділу ядер урану та плутонію витрачалась на динамічне руйнування активної зони реактора, яке врешті завершилось струменевим викидом цієї зони в центральний зал, де внаслідок турбулентного змішування з повітрям відбулась детонація гетерогенної суміші подрібненого ядерного палива, графіту, парів та газів. В свою чергу, ця детонація активувала більш потужний механізм колапсного удару на ультрахолодних нейтронах, що захоплювались субмікронними частинками зрідженого графіту з розмірами, відповідними дебрюїлівській довжині хвилі нейтронів. При колапсі нейтронізованих крапель графіту генерувались протони та нейтрони з енергіями порядку 10–100 PeV, що обумовило колосальний рівень наведеної радіації на руїнах енергоблоку. Ефективна температура згорання графіту у локально термодинамічно-рівноважній підсистемі динамічного кооперативу складала 18000–19000 °K. Це сприяло термічній деструкції ядерного палива у вигляді діоксиду урану, в ході якої виділявся кисень, що підтримував горіння графіту. Таким чином більша частина опроміненого ядерного палива була переведена в стан плазми. Оборнений енергетичний каскад, характерний для такого роду динамічних кооперативів, обумовив перенесення енергії з епіцентру колапсного удару (в центральному залі над шахтою реактора на висоті 5–10 м над рівнем підлоги) на периферію, що сформувало комірчасту спіново-детонаційну структуру руйнацій. Активна фаза катастрофи завершилась формуванням струменевої вихор-хвильової структури, яка інтегрувалась в систему повітряних течій тропосфери Землі, обумовлюючи глобальне радіаційне забруднення планети. Величина цього забруднення на порядок перевищує офіційні дані. Такого роду катастрофічні процеси виходять за рамки існуючих фізичних концепцій та методів розрахунку ядерних енергетичних установок, що створює ризик нових катастроф в енергетиці. Відмічено, що катастрофа на СШГЕС також мала вихор-хвильову природу, однак без ядерної енергетичної накачки, що обумовило значно менший масштаб руйнувань. Розглядається колапсний механізм долому експлуатаційно ослаблених шпильок кришки турбіни другого гідроагрегату СШГЕС. Показано, що розглянута псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка є катастрофічним виявом корпускулярно-хвильового дуалізму в макросистемах.

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, Саяно-Шушенська катастрофа, бафтинг, флаттер, колапс, гетерогенна система, ультрахолодні нейтрони, колапсний удар, вихор-хвильова динаміка, корпускулярно-хвильовий дуалізм.

YU. P. ZASPA
Khmelnitskyi National University, e-mail: zaspa_yuriy@ukr.net

NUCLEAR AND HYDRODYNAMIC BUFFETING, FLUTTER AND COLLAPSE IN HETEROGENIC SYSTEMS: PSEUDO-COOPERATIVE VORTEX-WAVE DYNAMICS AND TOPOLOGY OF CHERNOBYL AND SAYANO-SHUSHENSKAYA CATASTROPHES

The physical mechanisms of the Chernobyl and Sayano-Shushenskaya catastrophes were established. The formal cause of the Chernobyl catastrophe was the absurdity of the approved program of the turbine generator system, which did not include mechanisms used for controlled disposal of excess internal energy of the reactor coolant after the cut-off of the steam turbine flow. It was the energy that gave rise to the formation of an uncontrolled vortex-wave structure of the hydrodynamic velocity field, which later was cascaded amplified and topologically transformed with the connection of the corresponding structures of strong and weak fields. In the very first few seconds after closing the globe (stop) turbine valves the cascade flutter of the nuclear fuel element and operationally worn parts of channels of a reactor developed. In 10-20 seconds, the flutter turned into a strongly expressed buffeting. This influenced the division of nuclear fuel in the nuclear fuel elements and the transition of the stopping isotope of xenon - 135 (previously accumulated in the so-called iodine pit) from nuclear fuel to the gas phase. This factor, in addition to cavitation neutrons slowing in the vortex-wave velocity field influenced the emergency acceleration of the reactor on ultracold neutrons, which were not registered by reactor power control systems, designed for thermal neutrons with relatively large free path distance. The lion's share uranium and plutonium nuclear fission energy was spent on dynamic destruction of the reactor core, which as a result ended with the release of the jet zone in the central hall, where due to turbulent mixing with air detonation of heterogeneous mixture of crushed fuel, graphite, vapours and gases occurred. In turn, this detonation activated more powerful mechanism of collapse hit of ultracold neutrons which were up taken by submicron particles of liquid graphite with dimensions

corresponding to de Broglie neutron wavelength. With the collapse of neutron droplets of graphite, protons and neutrons were generated with energies of the 10-100 PeV range, which caused the colossal level of radiation induced on the ruins of the power unit. The effective temperature of graphite combustion in a locally thermodynamically equilibrium subsystem of a dynamic cooperative was 18000-19000 ° K. This influenced the thermal destruction of nuclear fuel in the form of uranium dioxide, during which oxygen that supported the burning of graphite was released. Thus, the bigger amount of the irradiated nuclear fuel was transferred to the plasma state. The inverse energy cascade characteristic for such kind of dynamic cooperatives led to the transfer of energy from the epicentre of collapse hit (in the main hall above the reactor well at a height of 5-10 m above the floor level) to the periphery, which formed a spin-detonation cellular structure destruction. The active phase of the disaster ended with the formation of the jet vortex-wave structure, which integrated into the system of air currents of the Earth's troposphere, causing global radiation contamination of the planet. The magnitude of this contamination is much higher than official data. Such catastrophic processes go beyond the existing physical concepts and methods of calculating nuclear power plants, which poses a risk of new catastrophes in the energy field. It was marked that the catastrophe at the Sayano-Shushenskaya Dam also had a vortex-wave nature, but without nuclear power pumping, which resulted in a much smaller scale of destruction. The collapse mechanism of the runaway of the operationally weakened pins of the turbine cover of the second hydrogenerator Sayano-Shushenskaya Dam is investigated. It is shown that the considered pseudo-cooperative vortex-wave dynamics is a catastrophic sighting of the corpuscular-wave dualism in macrosystems.

Key words: Chernobyl catastrophe, Sayano-Shushenskaya catastrophe, buffeting, flutter, collapse, heterogeneous system, ultracold neutrons, collapse hit, vortex-wave dynamics, corpuscular-wave dualism.

Вступ

Чорнобильську (26.04.1986) та Саяно-Шушенську (17.08.2009) катастрофи не прийнято ставити в один ряд. Однак, вони подібні вже у тому відношенні, що істинні фізичні механізми обох катастроф не встановлені й досі. Ці механізми виходять за рамки існуючих знань та методів розрахунку енергетичних систем. Найбільш чітко та, на жаль, трагічно, це проявляється у перехідних та ненормативних режимах, або ж наприкінці експлуатаційних кампаній в умовах зношеності обладнання. Поєднання цих факторів також характерне для обох катастроф. Врешті ж їх об'єднує псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка, особливості якої розглядаються нижче.

Чорнобильська катастрофа

Аналіз механізмів Чорнобильської катастрофи триває вже більше трьох десятиліть і зазвичай зводиться до взаємних звинувачень конструкторів, наукового керівництва та експлуатаційників [1]. Розглянемо тут саме ті ключові моменти, що не беруться до уваги жодною із цих сторін. По-перше, це явна безглуздість самої програми експерименту з вибігу турбогенератора, ідеологічно санкціонованої генеральним конструктором реактора (НИКИЭТ) та генеральним проектувальником ЧАЕС (Гидропроект) [8]. Безглуздість підтримання т.з. власних потреб станції (у випадку максимальної проектно аварії) шляхом відсічення турбіни від парового потоку трагічно поєдналася із цілковитою відсутністю у програмі експерименту нормативів щодо керованої утилізації надлишкової внутрішньої енергії теплоносія. Професійне запитання начальника передаварійної четверної зміни реактора Ю. Ю. Трегуба (який уважно вивчив програму) “Куди приймати надлишкову потужність?” так і залишилось без відповіді зам. головного інженера ЧАЕС з експлуатації А. С. Дятлова [7, 8]. Останній у руслі прийнятих на той час традицій спланував проведення експерименту на перехідних режимах саме на кінець паливної кампанії – напередодні виведення енергоблоку на плановий середній ремонт. При цьому 75% тепловиділяючих збірок складало паливо початкового завантаження [8].

Між тим, проведені значно пізніше детальні дослідження стану такого роду відпрацьованих паливних збірок [9] свідчать про суттєве фретинг-зношування кріплень, обойм та інших контактних елементів касет, що неминуче виникає в процесі тривалої експлуатації ядерного реактора.

Все це разом узятє дало старт катастрофічному розвитку подій, коли вже через декілька секунд після закриття стопорно-регулюючих клапанів турбіни внаслідок дії різноманітних зворотних зв'язків розвинувся решітчастий флаттер паливних елементів у технологічних каналах реактора. Через 10-20 секунд він вже супроводжувався бафтингом – сильними ударами збірок об стінки каналів, частота яких падала, а потужність росла. Про це прямо свідчать (без розуміння причин появи дивних звуків, ударів, дрижання стін і підлоги) присутні на той час експлуатаційники [8].

Енергетична накачка такого роду процесів швидко змінилась з циклонічної (на фазових переходах теплоносія) на ядерну. Механізм цього переходу лежить поза компетенцією конструкторів та наукового керівництва проекту РБМК, що видно із недолугих чисельно-аналітичних розрахунків, зроблених з метою моделювання аварійних процесів [1, 2, 3, 6, 8]. В них зовсім не враховується суттєва зміна концентрації у ядерному паливі гальмуючого ізотопу ксенону-135, накопиченого на попередньому етапі короточасної зупинки реактора у т.з. йодній ямі. Бафтингові удари збірок об стінки каналів в умовах підігріву ядерного палива на потужності близько 200 МВт неминуче призводили до подрібнення паливних пігулок та переходу ксенону -135 в газову фазу, що за практичної відсутності стержнів-поглиначів в активній зоні вело до швидкого нарощування потужності ядерного поділу. Ліва частина цієї потужності йшла на динамічне руйнування реактора в процесі оберненого каскаду контактено-наведених кооперативних хвиль. Надалі тут використовується префікс “псевдо”, адже задіяне раніше словосполучення “кооперативна динаміка” [10, 11] неприйнятне по відношенню до катастроф.

Аварійний розгін реактора розпочався ще до натискання одіозної кнопки аварійного захисту АЗ-5 [1-8] і не був помічений штатними системами контролю потужності реактора. Адже внаслідок кавітаційного гальмування нейтронів у вихор-хвильовому полі швидкостей (розглядається нижче) різко посилилась доля ультрахолодних нейтронів, переріз реакції поділу на яких, як відомо [12], зростає обернено до швидкості. В умовах згаданої вище дегазації палива ксеноном -135 це сприяло різкому нарощуванню потужності реактора. Однак, воно не фіксувалось з огляду на малу довжину вільного пробігу ультрахолодних нейтронів,

зосереджених у технологічних каналах та недоступних внутрішній, а тим більше – зовнішній системам контролю потужності реактора. Лише на завершальних секундах активної фази катастрофи було зафіксоване різке збільшення потужності (рис. 1) – за рахунок каскадного вширення спектру нейтронів. Однак, відносно незначна величина потужності реакції поділу на теплових нейтронах (в межах нормативів реактора – рис. 1) аж ніяк не відповідала руйнівному максимуму реакції на ультрахолодних нейтронах. Більше того, основна енергетична накачка катастрофи на останніх секундах її активної фази здійснювалась не за рахунок ядерного поділу, а шляхом колапсних процесів, які розглядаються нижче.

Псевдокооперативна вихор-хвильова динаміка розгону реактора описується співвідношенням [10,11]:

$$\lambda^2 / \tau = 4\pi v_{co} \cdot |\cos \theta|, \tag{1}$$

де λ , τ – довжина хвилі та характерний часовий параметр збурень, v_{co} – кооперативна в'язкість системи, θ – кут між дійсною та уявною компонентами хвильового вектору. Для динамічних систем масштабу ядерного енергоблока слід прийняти $v_{co} \approx 3 \cdot 10^5$ см²/с, що відповідає глобальній кооперативній в'язкості в системі Земля-Місяць [10, 11]. З фактичних даних щодо тиску в барабан-сепараторах (рис. 2) неважко встановити початкове значення $\tau \approx 33$ с як різницю часових максимумів тиску у 1.23.46 та 1.23.13. Це значення при $|\cos \theta| \approx 1$ відповідає довжині хвилі $\lambda \approx 120$ м, яка узгоджується з периметром теплових комунікацій реактора. При $\tau \approx 2-3$ с (від 1.23.46 (47) до 1.23.49) аналогічна оцінка дає значення $\lambda \approx 25-35$ м, що в цілому відповідає як периметру активної зони реактора, так і висоті динамічного струменевого виносу цієї зони в центральний зал – до моменту детонації. Здвоєний удар приблизно у 1.23.46(47), який відчули більшість співробітників станції [8], відповідав послідовному динамічному пошкодженню днища реактора у південно-східному квадранті [4, 5] та кріплень кришки реактора. Просторова анізотропія та локальна концентрація енергії таких барфтингових ударів вельми характерна для псевдокооперативних вихор-хвильових систем [10, 11]. Ці удари супроводжувались гідродурами в деаераторах та аварійним відкриттям всіх восьми головних запобіжних клапанів у приміщеннях барабан-сепараторів [8].

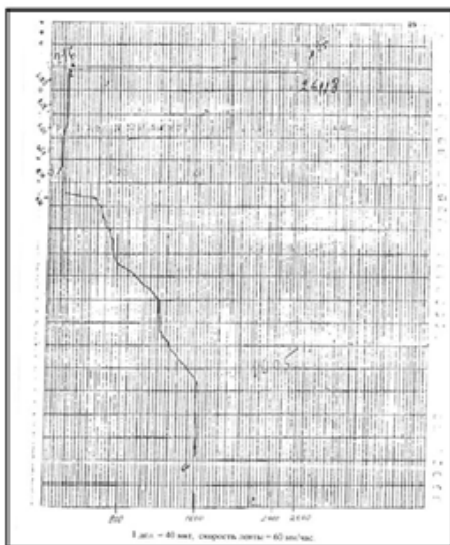


Рис. 1. Копія діаграмної стрічки з приладу “Мощность по СФКРЭ” (БЩУ-4, 26.04.86) [8]

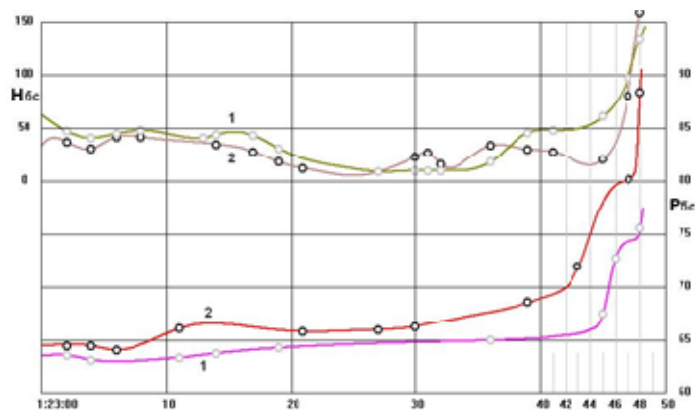


Рис. 2. Рівень H_{BC} (мм) та тиск P_{BC} (кг/см²) в барабані сепараторі: 1 – ліва половина, 2 – права половина [6]

Завершальний етап активної фази катастрофи розпочався детонацією гетерогенної суміші роздрібленого ядерного палива та графіту з парами і газами в приміщенні центрального залу орієнтовно на висоті 5-10 м над підлогою. Ця детонація, в свою чергу, стала активатором більш потужного колапсного удару на ультрахолодних нейтронах. Особливістю такого роду нестационарних процесів є наявність двох енергетично-зв'язаних підсистем: локально термодинамічно-рівноважної (для якої може бути введене поняття температури) та термодинамічно-нерівноважної (локально та глобально) вихор-хвильової підсистеми широкого діапазону часових та просторових масштабів. Суміщення в просторі та часі цих двох підсистем в єдину динамічну систему є основним каменем спотикання існуючих фізичних теорій та методів розрахунку енергетичних систем. Таке суміщення здійснюється завдяки корпускулярно-хвильовому дуалізму матерії через теплове випромінювання, а не шляхом теплопровідності.

В результаті згаданого вже колапсного удару на ультрахолодних нейтронах зруйновані приміщення енергоблоку та навколишню територію вкрила чорна сажа (кіптява), відмічена очевидцями [8, 13]. Як слідує з [14], чорний колір діоксиду урану відповідає розмірам частинок $\approx 0,05$ мкм. Це справедливо і для графіту. За законом Віна для теплового випромінювання довжина хвилі $\lambda = \pi d \approx 1,6 \cdot 10^{-7}$ м співвідноситься з температурою

$$T = \frac{b}{\lambda} \approx 18000 - 19000 \text{ } ^\circ\text{K}, \quad (2)$$

де b – постійна Віна. Настільки висока температура згорання вуглецю не могла бути забезпечена однією лишень хімічною реакцією з киснем. Основна енергетична накачка процесу йшла за рахунок колапсу зріджених частинок графіту разом із захопленими ними ультрахолодними нейтронами. Найефективніше це протікає за умови:

$$\lambda = \lambda_D = \frac{h}{mv}, \quad (3)$$

де λ_D – дебройлівська довжина хвилі ультрахолодних нейтронів, h – постійна Планка, m, v – маса та швидкість нейтрона. Швидкість захопленого нейтрона рівна швидкості краплини графіту та в середньому становить:

$$\langle v \rangle = \left(\frac{8}{\pi} \cdot \frac{kT}{M} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

де k – постійна Больцмана, M – маса краплини:

$$M = \rho \cdot \pi d^3 / 6 \approx 1,1 \cdot 10^{-19} \text{ кг}. \quad (5)$$

Тут $\rho = 1,6 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – оціночна густина реакторного графіту. Підстановка (2), (5) у (4) приводить до значення:

$$\langle v \rangle \approx 2,4 \text{ м/с}, \quad (6)$$

що відповідає характерному діапазону швидкостей ультрахолодних нейтронів [12]. В такому випадку середня дебройлівська довжина хвилі нейтронів

$$\langle \lambda_D \rangle = \frac{h}{m \langle v \rangle} \approx 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}, \quad (7)$$

що замикає розрахунок, підтверджуючи таким чином запропонований фізичний механізм. Довжина хвилі (7) співвідноситься з ультрафіолетовим світлом, яке супроводжувало колапс нейтронізованих крапель графіту. Це цілком відповідає суб'єктивному враженню очевидців (із врахуванням спектральної чутливості ока): "... типу фотоспалаху" (апаратник азотно-кисневої станції Н. С. Бондаренко з відстані ≈ 200 м від четвертого енергоблоку) [13]. Синьо-фіолетове свічення над руїнами вже після активної фази катастрофи, згадане очевидцями [13], обумовлювалось остаточною іонізацією парів та газів.

За температурних максимумів (2) в епіцентрі колапсного удару відбувалась інтенсивна деструкція ядерного палива у вигляді діоксиду урану, в ході якої виділявся кисень, що підтримував горіння графіту. Це супроводжувалось переходом опроміненого ядерного палива в стан плазми, що згодом була винесена в атмосферу. При колапсі нейтронізованих крапель графіту генерувались протони та нейтрони надвисоких енергій порядку 10–100 ReV – відповідних енергії спокою частинок з масою (5). Це обумовило колосальний рівень наведеної радіації на руїнах енергоблоку. Отже, ми в цілому підтримуємо версію незалежного експерта і героїчного дослідника Чорнобиля К. П. Чечерова про ядерний характер завершального вибуху та суттєвий дефіцит опроміненого ядерного палива в об'єкті "Укриття" [5, 15]. Це вперто намагаються спростувати ядерні функціонери [4].

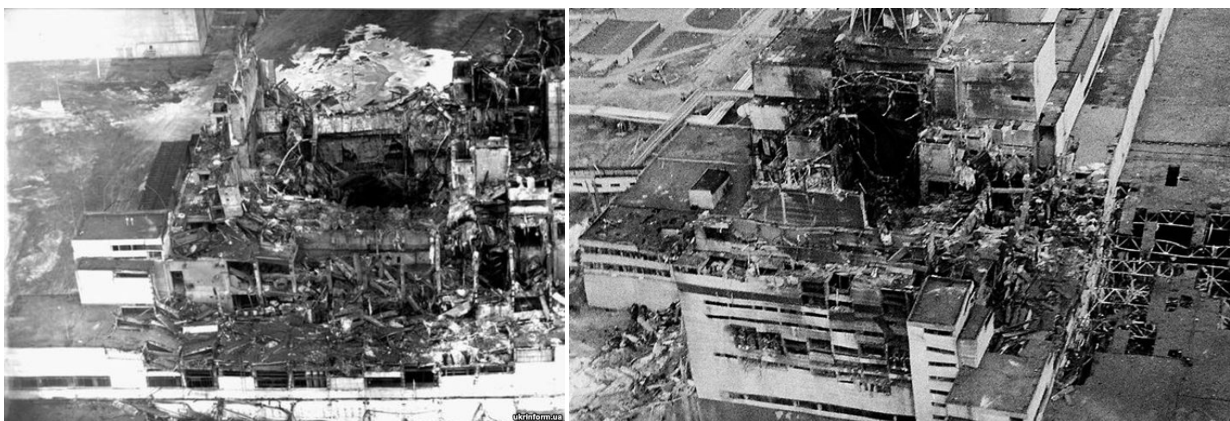


Рис. 3. Руїни Чорнобильської катастрофи

В процесі надзвукового поширення вихор-хвильової детонаційної структури з епіцентру колапсного удару на периферію вона суттєво підсилилась за рахунок енергії конденсації водяної пари в приміщеннях барабан-сепараторів, накопиченої в результаті аварійного відкриття всіх восьми головних запобіжних клапанів. Це обумовило комірчасту структуру та просторову анізотропію руйнувань – переважно на північ та на південь – рис. 3. Екрануючий ефект кришки реактора та хвилеводний ефект центрального залу забезпечили, відповідно, відносну цілісність західної стіни енергоблоку та значний масштаб руйнувань на схід від епіцентру (рис. 3).

Топологія катастрофи в цілому узгоджується з механізмами пульсуючої та спінової детонації [16]. В рамках моделей [10-11] ця топологія описується мінімізацією магнітно-сильної та магнітно-слабкої енергії поля, а також гідродинамічної енстрофії – за умов збереження спінової спіральності полів у локалізованих областях D простору:

$$\left| \int_D \varepsilon \cdot dV_D \right| \geq \left| \int_D h_{sv} \cdot dV_D \right| \quad (8)$$

$$\varepsilon = \frac{(\text{rot} \vec{V})^2}{2}, \quad h_{sv} = \frac{i\omega(\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{v_{co}} = \frac{(\vec{\nabla} \vec{V}) \cdot (\vec{V})^2 \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r})}{v_{co}} \quad (9, 10)$$

Тут ε, h_{sv} – відповідно густини енстрофії та спінової спіральності, \vec{V} – вектор-потенціал полів з розмірністю швидкості, ω, \vec{k} – циклічна частота та хвильовий вектор окремої моди, \vec{r} – радіус-вектор, i – уявна одиниця. Магнітна компонента енергії вихор-хвильової структури сильного, слабого та гідродинамічного полів характеризується об’ємною густиною [11]:

$$w_m = \frac{c^2 \cdot (\text{rot} \vec{V})^2}{8\pi\mu g}, \quad (11)$$

де c – швидкість світла у вакуумі, μ – аналог магнітної проникності середовища, g – калібрувальна константа з розмірністю сталі всієї системи та визначається всіма доступними джерелами енергії – в даному випадку – руйнівними. Як слідує з (10), невід’ємною умовою утворення такого роду топологічних структур є стискуваність середовища (дивергентність поля швидкостей), в якому вони поширюються. Даний розгляд можливий лише в комплексному розширенні дійсного Евклідового простору, що виходить за рамки існуючих на-сьогодні фізичних концепцій [11].

Активна фаза Чорнобильської катастрофи завершилась формуванням вертикальної вихор-хвильової стуменевої структури, що цілком інтегрувалась в систему повітряних течій тропосфери Землі та обумовила глобальне радіаційне забруднення планети. Величина цього забруднення на порядок перевищує офіційні дані [4].

Наведена тут фізична схема розвитку катастрофи узгоджується з відомими результатами післяаварійних досліджень (за вже згадуваними виключеннями). Зокрема, наявність паливовмісних скломас у підреакторних приміщеннях з найрізноманітнішими за морфологією включеннями [14] підтверджує відмічену вище динамічну, топологічну та енергетичну взаємопов’язаність двох підсистем: локально-рівноважної та нерівноважної. Згадана вище дегазація опроміненого ядерного палива ксеноном-135 підтверджується мікрофотографіями паливних частинок у Чорнобильських викидах – рис. 4, 5. Опущання нижньої плити реактора на 3-4 м [4, 5], вочевидь, відбулось на етапі струменевого винесення активної зони в центральний зал.

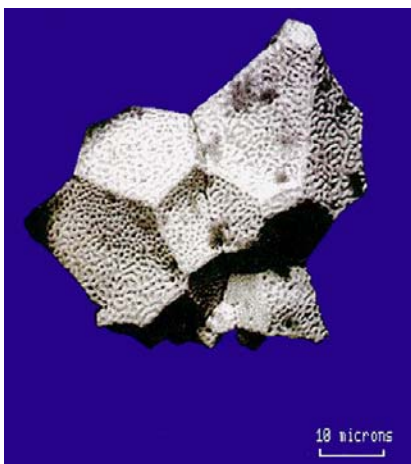


Рис. 4. Мікрофотографія паливної частинки з явно вираженою пористістю, яка виникла в процесі інтенсивної дегазації ядерного палива [4]

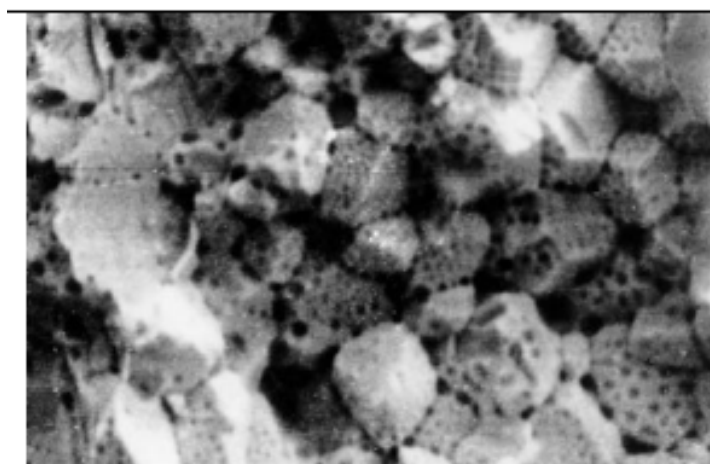


Рис. 5. Мікроблочна пориста структура паливної частинки з периферійних ділянок твєлів: розмір мікроблоків $\approx 2-18$ мкм, розмір пор $\approx 0,5 - 1,5$ мкм [14]

Дослідження вмісту характеристичних ізотопів ксенону у Чорнобильських викидах, проведені спеціалістами Радієвого інституту ім. В. Г. Хлопіна [17] у м. Череповець (1000 км від Чорнобиля) одразу після катастрофи, виявили суттєве відхилення відношення цих ізотопів від величини, характерної для нормативних режимів роботи ядерних реакторів. Це було розцінено як підтвердження миттєвого ядерного енерговиділення з енергетичним внеском $\sim 0,01 - 0,1\%$ від наявного загального запасу палива в реакторі [17]. Однак, ці та більш пізні [18] розрахунки проводились на основі традиційної схеми поділу ядер урану та плутонію на теплових нейтронах, що врешті привело до хибної інтерпретації Чорнобильської катастрофи як

результату локального ядерного вибуху в одному, або ж декількох технологічних каналах [17,18].

Саяно-Шушенська катастрофа

Окремі аспекти цієї катастрофи вже аналізувалися нами раніше в контексті контактної динамо [10]. Вихор-хвильова динаміка тут також описується співвідношенням (1). Характерні часові параметри неважко визначити із сейсмограм катастрофи (рис. 6) та з відповідних спектрів (рис. 7). На сейсмограмах чітко проявлений обернений енергетичний каскад псевдокооперативних хвиль із характерними періодами: ≈ 1 с, $\approx 6-7$ с, ≈ 20 с. Ці періоди згідно (1) при $v_{co} \approx 3 \cdot 10^5$ см²/с, $|\cos \theta| \approx 1$ відповідають наступним довжинам хвиль λ вихор – хвильових конфігурацій поля швидкостей: ≈ 19 м, ≈ 50 м, ≈ 185 м. Перша величина співпадає з периметром відсмоктуючої труби у затурбінному відділенні [19], друга близька до периметру спіральної камери, третя – до сумарного периметру спіральної та турбінної камер. Разом вони описують псевдокооператив структур, що стали справжнім прокляттям СШГЕС з часів її освоєння та введення в експлуатацію [19]. Ці структури у ненормативних другій та четвертій зонах роботи гідроагрегатів СШГЕС проявляли себе високим рівнем низькочастотних вібрацій турбінного підшипника (обернений бафтинговий каскад на спектрі рис. 8а) та високочастотними флаттерними коливаннями лопаток конструктивно слабкого направляючого апарату (рис. 8б, прямиий каскад) [20]. Бафтинговий діапазон частоти $\approx 0,4 - 0,5$ Гц традиційно пов'язувався з ударами вихорового джгута об стінки відсмоктуючої труби [19] та з приєднанням до цих стінок завихореного відриву потоку з лопатей турбіни [21].

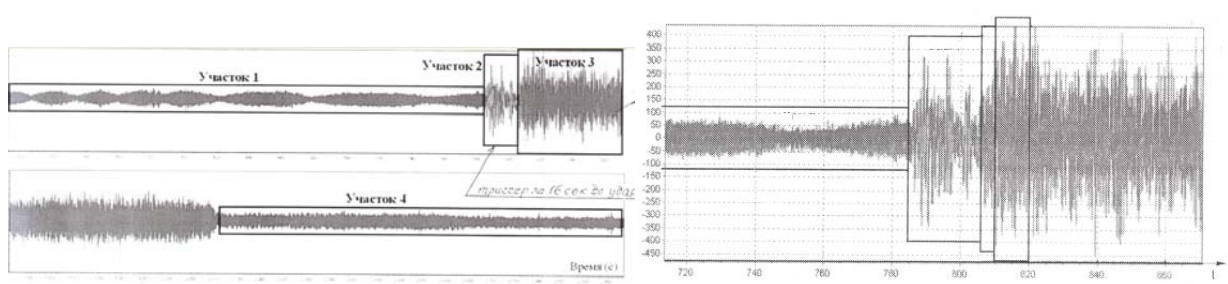


Рис. 6. Сейсмограми Саяно-Шушенської катастрофи [23, 24]

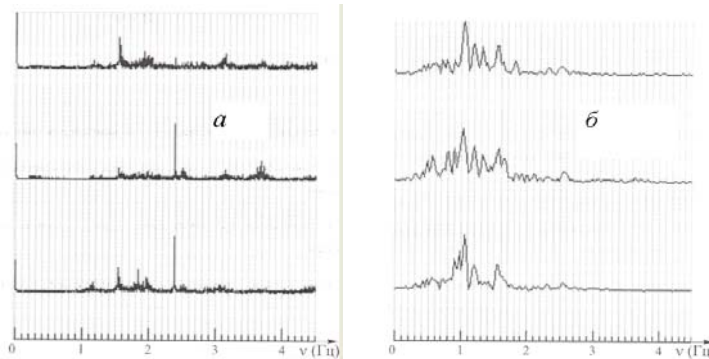


Рис. 7. Спектри сейсмограм до катастрофи (а) та на першому етапі катастрофи (б) [24]

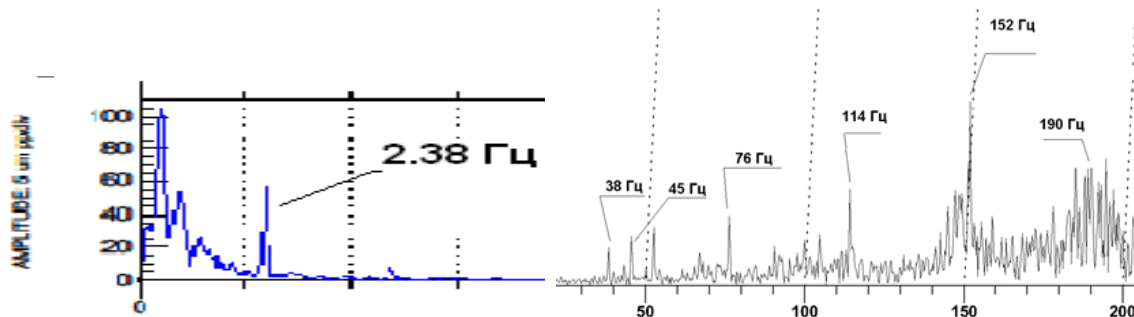


Рис. 8. Амплітудно-частотні спектри вібросигналів з корпусу турбінного підшипника (зліва) та з лопаток направляючого апарату (справа) гідроагрегату СШГЕС [20]

Таке приєднання зовсім не описується розробленими після катастрофи чисельно-аналітичними методами [22]. Між тим, саме воно обумовлює специфічне контактне “спотикання” потоку на стінках відсмоктуючої труби у другій та четвертій зонах роботи, яке передається вгору та дестабілізує весь потік. При цьому суттєву роль відграють кавітаційні процеси – як на лопастях турбіни, так і на стінках відсмоктуючої труби.

Однак, як видно з порівняння спектрів на рис. 7б та рис. 8а, під час катастрофи сталися певні топологічні зміни вихор-хвильової структури поля швидкостей: замість основної частоти $\approx 0,4 - 0,5$ Гц домінуючою стала її друга гармоніка, вельми близька до частоти основної моди радіальних коливань

плотини СШГЕС при максимальному на час катастрофи напорі ($\approx 1,15$ Гц) [10]. Ця близькість, по суті, стала фатальною, об'єднуючи в єдиний динамічний псевдокооператив вже не тільки водяний тракт ГА-2, але й усю плотину разом з уміщуючим геологічним середовищем. Відмічені вже зони D концентрації завихореності та спінової спіральності поля швидкостей припадали у т.ч. на тектонічні розломи під фундаментом гідроагрегатів [10, 23], а також на ослаблені в процесі тривалої експлуатації шпильки кришки турбіни другого гідроагрегату. До закінчення нормативного 30-літнього терміну експлуатації він не допрацював всього два місяці.

Механізм злому цих шпильок, а також злому верхніх цапф лопаток направляючого апарату ГА-2 неодноразово розглядався в останні роки [20, 21, 24–27]. Однак, зазвичай не береться до уваги комплексний характер цих руйнівних процесів. Фатальна тріада бафтинг-флаттер-колапс згідно (1) охоплювала діапазон просторових масштабів близько восьми порядків величини та відповідний діапазон часових масштабів близько шістнадцяти порядків величини. Верхні межі цих діапазонів забезпечувались колапсними процесами мікронних просторових та мікрохвильових частотних масштабів. На рис. 9 наведені фотографії зломів на шпильках кришки турбіни та на верхніх цапфах лопаток направляючого апарату (НА) аварійного другого гідроагрегату. Фіолетово-синій колір поверхневих оксидних плівок, якими вкриті ці деталі, свідчить про розігрів до температур близько 300°C (вуглецева конструкційна сталь -35 шпильок [25, 26]) та близько 600°C (легована кавітаційностійка сталь 10X12НДЛ лопаток направляючого апарату [27]). Ці температури напряму пов'язані з псевдокооперативним механізмом злому. Відмітимо, що площа розкритих втомних тріщин на зломах цапф (рис. 9б) не перевищує 5 – 10%, в той час, як на зломах шпильок (рис. 9а) вона в середньому становила 65% [25]. Це підтверджує суттєву роль втомних пошкоджень шпильок у механізмі аварії. Однак, наявність високих температур як на шпильках, так і на цапфах, свідчить про їх спільне походження. Дисипація ентропії (9), спіральності (10) та енергії (11) на поверхнях втомних тріщин дає старт аварійному зростанню температури у прилеглих шарах матеріалу. Це різко інтенсифікує процес термогенерації дефектів кристалічної структури. Внаслідок корпускулярно-хвильового дуалізму цих дефектів вони захоплюються вихор-хвильовими формами поля швидкостей та врешті стікають на поверхні втомних тріщин та на границі зерен металу. Колапс такого роду структур на цих поверхнях та границях супроводжується виділенням енергії, яка йде на подальше розкриття тріщин та врешті – на долом матеріалу. Вирішальну роль у такому доломі поряд із колапсом відіграють також низькочастотний бафтинг та середньочастотний флаттер. Вони забезпечують високий рівень загального динамічного навантаження у всій системі. Як видно із сейсмограм катастрофи (рис. 6), крихкий колапсний долом кріплення кришки турбіни ГА-2 стався на третьому підряд бафтинговому ударі. Ці удари слідували з періодом $\approx 6\text{--}7$ секунд та включали флаттерні субперіоди близько секунди. Колапсний долом кріплення виразно проявив себе голосним акустичним хлопком, який почули робітники станції безпосередньо перед викидом стовпа води в районі ГА-2 у машинному залі [25].



Рис. 9. Фотографії зламаних шпильок кришки турбіни [26] (зліва) та зламаних верхніх цапф лопаток направляючого апарату [27] (справа) другого гідроагрегату СШГЕС

Наведено деякі математичні співвідношення щодо цих фізичних механізмів:

$$x \cdot e^x - 5 \cdot (e^x - 1) = 0, \quad b = \frac{hc}{4,965 \cdot k} \tag{12, 13}$$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{b}{T}, \quad v = \left(\frac{2kT}{M} \right)^{1/2} = \frac{hT}{mb} = \frac{4,965 \cdot kT}{mc} \tag{14, 15}$$

$$M = \frac{2}{kT} \cdot \left(\frac{mc}{4,965} \right)^2, \quad \frac{Mc^2}{mc^2} = \frac{2}{(4,965)^2} \cdot \frac{mc^2}{kT} \gg 1 \tag{16, 17}$$

$$\rho = \frac{59,58}{ch^3} \cdot (\pi mkT)^2, \quad T = \frac{(\rho ch^3 / 59,58)^{1/2}}{\pi mk} \quad (18, 19)$$

Тут 4,965 – корінь трансцендентного рівняння (12) для визначення постійної Віна [12]; λ – дебройлівська довжина хвилі захоплених дефектів кристалічної структури; v – швидкість цих дефектів, що приймається рівною найбільш ймовірній тепловій швидкості вихор-хвильових структур поля швидкостей з ефективною масою M ; m – ефективна маса дефектів; ρ – ефективна густина вихор-хвильових структур; h , k – постійні Планка та Больцмана; c – швидкість світла у вакуумі; T – абсолютна температура. Приймаючи за m масу міжвузлових атомів ґратки заліза ($m \approx 56$ а.о.м.) та за ρ – типову густину сталі ($\rho \approx 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³), з (19) отримаємо значення абсолютної температури матеріалу $T \approx 800^\circ \text{K}$, яке близьке до величин, розглянутих вище. За цих умов із (14,15,16) слідує: $v \approx 2$ мм/с, $M \approx 5 \cdot 10^{-15}$ кг, $\lambda \approx 3,6$ мкм. Отримана величина λ добре узгоджується з мікронними масштабами границь зерен та частково розкритих втомних тріщин, на яких колапсують дефекти кристалічної структури, захоплені вихор-хвильовими формами поля швидкостей. Відмітимо врешті певні топологічні аналогії, характерні для завершальних стадій активних фаз Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Відносно повільне підймання ротора ГА-2 СШГЕС після зриву кріплень кришки турбіни врешті завершилось його струменевим винесенням в машинний зал (рис. 10), що до болю нагадує сценарій Чорнобильської катастрофи.



Рис. 10. Руїни Саяно-Шушенської катастрофи

Колапсні процеси на початковій стадії активної фази Чорнобильської катастрофи

Повертаючись до механізмів Чорнобильської катастрофи, використаємо співвідношення (12–19) для конкретизації цих механізмів щодо процесів колапсу. Передусім відмітимо недифузний вихор-хвильовий механізм транспортування дочірніх продуктів поділу ядер урану та плутонію на поверхню та у міжзеренний простір кристалів ядерного палива у вигляді діоксиду урану UO_2 . У якості температурного параметра візьмемо середнє арифметичне з аварійних трендів температури води на вході в активну зону ($\approx 200^\circ \text{C}$) та на зворотному підході води до головних циркуляційних насосів ($\approx 282^\circ \text{C}$) [6]. В абсолютних одиницях це середнє становитиме $T \approx 514^\circ \text{K}$. Підставляючи це значення у (18) при $\rho \approx 10 \cdot 10^3$ кг/м³ (експлуатаційне опромінене ядерне паливо [14]), отримаємо: $m \approx 102$ а.о.м., що відповідає ізотопам рутенію Ru та родію Rh . Саме ці ядра поряд із іншими елементами середньої частини таблиці Менделєєва найчастіше присутні у міжзеренному просторі паливних решіток Чорнобильських викидів [14]. Із (14) слідує величина $\lambda \approx 7$ мкм, яка добре узгоджується з типовим масштабом блочної структури периферійних зразків опроміненого палива – рис. 5. Власне для ксенону-135, який згадувався на початку, оптимальна температура вихор-хвильового транспортування на поверхню дещо нижча: $T \approx 390^\circ \text{K}$. Однак, в аварійному випадку швидкість недифузного вихор-хвильового транспортування цього гальмуючого ізотопу на поверхню була цілком достатньою для розгону реактора на ультрахолодних нейтронах.

Як виявилось, початкова стадія такого розгону забезпечувалась колапсом нейтронізованих кавітаційних каверн теплоносія у технологічних каналах реактора. При $T \approx 514^\circ \text{K}$, $m \approx 1$ а.о.м. (нейтрон) із (18) отримуємо значення ефективної густини речовини (та поля одночасно) у кавернах: $\rho \approx 0,9$ кг/м³. Із (14) маємо: $\lambda \approx 5$ –6 мкм як ефективний периметр каверни, що відповідає діаметру каверни $d \approx 1,8$ мкм. Колапс цих нейтронізованих каверн на стінках твєлів забезпечив початковий розгін реактора на ультрахолодних нейтронах. Швидкість останніх, як слідує з (15), становила $v \approx 0,07$ м/с, що характерно для ультрахолодних нейтронів [12]. Ефективна маса нейтронізованих каверн складала величину $M \approx 3 \cdot 10^{-18}$ кг.

На останніх секундах існування активної зони в шахті реактора характер колапсу суттєво змінився в зв'язку з цілковитим переходом теплоносія у парову фазу. Використаємо наступні співвідношення:

$$\rho = \frac{p \cdot m^*}{kT}, \quad T = \frac{h}{k} \cdot \left(\frac{p \cdot m^* \cdot c}{59,58 \cdot (\pi m)^2} \right)^{1/3} \quad (20,21)$$

Тут p – тиск пари, m^* – маса молекул води. Останньою точкою на аварійних трендах тиску в барабан-сепараторах був тиск 90 атм. – рис. 2. За цих умов при $m^* = 18$ а.о.м., $m \approx 1$ а.о.м. із (21) маємо: $T \approx 1750$ °К. Тоді з (20) слідує: $\rho \approx 10$ кг/м³. При цьому з (18) отримуємо: $\lambda \approx 1,7$ мкм, або ж $d \approx 0,5$ мкм – довжину хвилі та ефективний діаметр нейтронізованих парових вихор-хвильових конфігурацій поля швидкостей. Ефективна маса таких конфігурацій становить: $M \approx 9 \cdot 10^{-19}$ кг, а швидкість – $v \approx 0,2$ м/с.

У розрахунках [3] приймається, що розплавлення паливних пігулок та руйнування паливних збірок відбувається за умови перевищення середньої по перерізу твела температури у 3300 °К. Як слідує з цих розрахунків, в умовах розгону реактора на теплових нейтронах таке перевищення за наявності на початку катастрофи концентрації ксенону-135 могло статись лише у локальній частині активної зони реактора та в обмеженому числі паливних збірок (близько 200 із ≈ 1700 наявних). Залишимо ці результати на совісті недолугих конструкторів та обмеженого наукового керівництва проекту РБМК [3]. Справа тут, як уже відмічалось, зовсім не в теплових, а в ультрахолодних нейтронах. Як слідує з (21), відмічене перевищення температури досягається колапсним механізмом при тиску p водяної пари у технологічних каналах близько тисячі атмосфер. Це повністю руйнує активну зону реактора на останній секунді активної фази катастрофи, виносить цю зону в центральний зал, де й відбувається, як описано на початку, остаточний колапсний удар на нейтронізованих краплях графіту.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм в макросистемах

Зазвичай вважається, що корпускулярно-хвильовий дуалізм характерний лише для мікросистем – фактор маси в знаменнику (3). Однак, як видно, там присутній і фактор швидкості: при $v \rightarrow 0$ дебройлівська довжина хвилі λ_D стає невизначено великою. Якщо сповільнення в часі окремих елементів поля швидкостей будуть не хаотичними (як у локально термодинамічно-рівноважних системах), а скорельованими (кооперативними), то λ_D може бути макроскопічною. В такому випадку матеріальна система описується вже не як сукупність парних взаємодій на основі динаміки Ньютона (або ж локальних квантових теорій поля [12]), а як нелінійна система вихор-хвильових форм фундаментальних полів, що взаємодіють кооперативно [11]. Трагічним є те, що на оберненій стороні цієї медалі викарбувані імена та дати катастроф.

Висновки

Вище були розглянуті лише формальні механізми Чорнобильської та Саяно-Шушенської катастроф. Аналіз глибинних причин цих катастроф виходить не тільки за рамки даної роботи, але й за межі фізики як такої. Наведемо лише кінцевий результат: Чорнобиль – це трагедія не тільки України, Білорусі, чи то СРСР – це трагедія людства, яке знаходиться в заручниках у добре відомого автора сценаріїв такого роду катастроф і жертвоприношень. Альтернатива одна: в укріпленні Християнської моралі.

Література

1. Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ (INSAG-1) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://magate-1.narod.ru/>
2. Анализ причин аварии на Чернобыльской АЭС путем математического моделирования физических процессов. Отчет ВНИИАЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://accident.ru/WREPO.html>
3. Абагян А. А. Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС / А. А. Абагян, И. М. Аршовский, В. М. Дмитриев и др. // Атомная энергия. – 1991. – Т. 71, № 4. – С. 275–287.
4. Арутюнян Р. В. Ядерное топливо в объекте “Укрытие” Чернобыльской АЭС / Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Боровой А. А., Велихов Е. П., Ключников А. А. – М. : Наука, 2010. – 240 с.
5. Новосельский О. Ю. Технические аспекты аварии на 4-м энергоблоке Чернобыльской АЭС: Препринт ФГУП НИКИЭТ ЕТ-05/70 / Новосельский О. Ю., Черкашов Ю. М., Чечеров К. П. – М. : Изд-во “ГУП НИКИЭТ”, 2005. – 27 с.
6. Дмитриев В. М. Причины Чернобыльской аварии известны [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://accident.ru/datas.html>
7. Дятлов А. С. Чернобыль. Как это было [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.gtc2.ru/book/index.html>
8. Карпан Н. В. Чернобыль. Месть мирного атома [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://physiciansofchernobyl.org.ua/rus/book/Karpan.html>
9. Сухих А. В. Топливо канальных кипящих реакторов большой мощности / Сухих А. В., Сагалов С. С., Павлов С. В. – Дмитровград : Изд-во АО “ГНЦ НИИАР”, 2016. – 185 с.
10. Заспа Ю. П. Контактне динамо як генератор когерентних (кооперативних) космічних форм руху та джерело планетарної, сонячної, галактичної і метagalacticної енергії та електромагнетизму. Частина VIII / Ю. П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 5. – С. 226–239.
11. Заспа Ю. П. Кооперативна динаміка, взаємодукція, комплексна топологія та гіперкомплексна

хронологія вихор-хвильових форм електромагнітного, гравітаційного, сильного і слабого, а також гідродинамічного полів проти хибних стандартів SM та Λ CDM / Ю. П. Заспа // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2019. – № 1. – С. 254–266.

12. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая росс энц., 1999. – 760 с.

13. Свидетельства очевидцев Чернобыльской аварии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://accident.ru/evid02.html>

14. Савоненков В. Г. Радиологическое исследование топливосодержащих новообразований, возникших в результате аварии на Чернобыльской АЭС / В. Г. Савоненков, Е. Б. Андерсон, Е. А. Смирнова, С. И. Шабаяев // Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина. – 2009. – Т. XIV. – С. 87–117.

15. Чечеров К. П. Взрыв был один, и он был ядерный [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.novayagazeta.ru/articles/20011/04/21/5877-vzryv-by-odin-i-on-by-ya-dernyy>

16. Денисов Ю. Н. Механизм детонационного сгорания / Ю. Н. Денисов, Я. К. Трошин // ПМТФ. – 1960. – № 1. – С. 21–35.

17. Пахомов С. А. Оценка величины мгновенного энерговыделения при аварии реактора на ЧАЭС / С. А. Пахомов, Ю. В. Дубасов // Труды Радиового института им. В. Г. Хлопина. – 2009. – Т. XIV. – С. 79–86.

18. De Geer L.-E. A Nuclear jet at Chernobyl Around 21:23:45 UTC on April 25, 1986 / L.-E. De Geer, C. Persson, H. Rodhe // Nuclear Technology. – 2018. – V. 201, № 1. – P. 11–22.

19. Брызгалов В. И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций / Брызгалов В. И. – Красноярск : Изд. дом “Суриков”, 1999. – 561 с.

20. Клюкач А. А. Влияние асимметрии спиральной камеры на вибрации гидроагрегата [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.plotina.net/experts/klykach>

21. Клюкач А. А. О вибрации на агрегате № 2 СШГЭС до аварии. Дискуссии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://tayga.info/details/2011/02/02/~102283>

22. Бабаченко Ю. В. Расчетное исследование радиальных сил, действующих на ротор радиально-осевой гидротурбины / Ю. В. Бабаченко, А. Ю. Авдюшенко // Известия Самарского научного центра РАН. – 2013. – Т. 15, № 4(2). – С. 547–552.

23. Марчук А. Н. Геологические и геодинамические аспекты в комплексе причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС / А. Н. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 48–57.

24. Лобановский Ю. И. Гидроакустический бустинг – способ возбуждения катастрофических автоколебаний в напорной системе Саяно-Шушенской ГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://synerjetics.ru/article/busting.htm>

25. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного общества “РусГидро” – “Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного”. – М. : Ростехнадзор, 2009. – 50 с.

26. Рассохин Г. О разрушении узла крепления крышки турбины гидроагрегата № 2 СШГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-4/>

27. Бикол. Частное Расследование технических причин аварии гидроагрегата № 2 Саяно-Шушенской ГЭС [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://samlib.ru/b/boris-i-k/sajanges-rassledovanie.shtml/>

References

1. Informacija ob avarii na Chernobyl'skoj AJeS i ee posledstvijah, podgotovlennaja dlja MAGATJe (INSAG-1) [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://magate-1.narod.ru/>

2. Analiz prichin avarii na Chernobyl'skoj AJeS putem matematicheskogo modelirovanija fizicheskikh processov. Otchet VNIAJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://accident.ru/WREPO.html>

3. Abagjan A. A. Raschetnyj analiz nachal'noj stadii avarii na Chernobyl'skoj AJeS / A. A. Abagjan, I. M. Arshovskij, V. M. Dmitriev i dr. // Atomnaja jenergiya. – 1991. – Т. 71, № 4. – С. 275–287.

4. Arutjunjan R. V. Jadernoe toplivo v ob#ekte “Ukrytie” Chernobyl'skoj AJeS / Arutjunjan R. V., Bol'shov L. A., Borovoj A. A., Velihov E. P., Kljuchnikov A. A. – М. : Nauka, 2010. – 240 s.

5. Novosel'skij O. Ju. Tehnicheskie aspekty avarii na 4-m jenerglobloke Chernobyl'skoj AJeS: Preprint FGUP NIKIJeT ET-05/70 / Novosel'skij O. Ju., Cherkashov Ju. M., Chechero K. P. – М. : Izd-vo “GUP NIKIJeT”, 2005. – 27 s.

6. Dmitriev V. M. Prichiny Chernobyl'skoj avarii izvestny [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://accident.ru/datas.html>

7. Djatlov A. S. Chernobyl'. Kak jeto bylo [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.rrc2.ru/book/index.html>

8. Karpan N. V. Chernobyl'. Mest' mirnogo atoma [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://physiciansofchernobyl.org.ua/rus/book/Karpan.html>

9. Suhij A. V. Toplivo kanal'nyh kipjashhih reaktorov bol'shoj moshhnosti / Suhij A. V., Sagalov S. S., Pavlov S. V. – Dimitrograd : Izd-vo AO “GNC NIIAR”, 2016. – 185 s.

10. Zaspa Ju. P. Kontaktne dinamo jak generator kogerentnih (kooperativnih) kosmichnih form ruhu ta dzherelo planetarnoї, sonjachnoї, galaktichnoї i metagalaktichnoї energii ta elektromagnetizmu. Chastina VIII / Ju. P. Zaspa // Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tehnichni nauki. – 2017. – № 5. – С. 226–239.

11. Zaspa Yu. P. Kooperatyvna dinamika, vzaiemoinduktsiia, kompleksna topolohiia ta hiperkompleksna khronolohiia vykhor-khvylovykh form elektromahnitnoho, hravitatsiinoho, synloho i slabkoho, a takozh hidrodinamichnoho poliv proty khybnykh standartiv SM ta LSDM / Yu. P. Zaspa // Herald of Khmelnytskyi National University. – 2019. – № 1. – С. 254–266.

12. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. – М. : Большая росс яенц., 1999. – 760 с.

13. Свидетельства очевидцев Чернобыльской аварии [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://accident.ru/evid02.html>

14. Savonenkov V. G. Radiologicheskoe issledovanie toplivosoderzhshih novoobrazovanij, vznikshih v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AJeS / V. G. Savonenkov, E. B. Anderson, E. A. Smirnova, S. I. Shabayev // Trudy Radiovogo instituta im. V.G. Hlopinga. – 2009. – Т. XIV. – С. 87–117.

15. Chechero K. P. Vzryv byl odin, i on byl jadernyj [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.novayagazeta.ru/articles/20011/04/21/5877-vzryv-by-odin-i-on-by-ya-dernyy>

16. Denisov Ju. N. Mehanizm detonacionnogo sgoraniya / Ju. N. Denisov, Ja. K. Troshin // PMTF. – 1960. – № 1. – S. 21–35.
17. Pahomov S. A. Ocenka velichiny mgновенного jenergovydeleniya pri avarii reaktora na ChAJeS / S. A. Pahomov, Ju. V. Dubasov // Trudy Radievogo instituta im. V. G. Hlopina. – 2009. – T. XIV. – C. 79–86.
18. De Geer L.-E. A Nuclear jet at Chernobyl Around 21:23:45 UTC on April 25, 1986 / L.-E. De Geer, C. Persson, H. Rodhe // Nuclear Technology. – 2018. – V. 201, № 1. – R. 11–22.
19. Bryzgalov V. I. Iz opyta sozdaniya i osvoeniya Krasnojarskoj i Sajano-Shushenskoj gidrojelektrostantsij / Bryzgalov V. I. – Krasnojarsk : Izd. dom “Surikov”, 1999. – 561 s.
20. Kljukach A. A. Vlijanie asimetrii spiral'noj kamery na vibracii gidroagregata [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.plotina.net/experts/kljukach>
21. Kljukach A. A. O vibracii na agregate № 2 SShGJeS do avarii. Diskussii [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://tayga.info/details/2011/02/02/~102283>
22. Babachenko Ju. V. Raschetnoe issledovanie radial'nyh sil, dejstvujushhij na rotor radial'no-osevoj gidroturbiny / Ju. V. Babachenko, A. Ju. Avdjushenko // Izvestija Samarskogo nauchnogo centra RAN. – 2013. – T. 15, № 4(2). – S. 547–552.
23. Marchuk A. N. Geologicheskie i geodinamicheskie aspekty v komplekse prichin avarii na Sajano-Shushenskoj GJeS / A. N. Marchuk // Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo. – 2012. – № 1. – S. 48–57.
24. Lobanovskij Ju. I. Gidroakusticheskij busting – sposob vzbuzhdeniya katastroficheskij avtokolebanij v napornoj sisteme Sajano-Shushenskoj GJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://synerjetics.ru/article/busting.htm>
25. Akt tehničeskogo rassledovanija prichin avarii, proishedshej 17 avgusta 2009 goda v filiale Otkrytogo Akcionernogo obshhestva “RusGidro” – “Sajano-Shushenskaja GJeS imeni P. S. Neporozhnego”. – M. : Rostehnadzor, 2009. – 50 s.
26. Rassohin G. O razrushenii uzla krepjenija kryshki turbiny gidroagregata № 2 SShGJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://www.plotina.net/sshges-rassokhin-4/>
27. Bicol. Chastnoe Rassledovanie tehničeskij prichin avarii gidroagregata № 2 Sajano-Shushenskoj GJeS [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu : <http://samlib.ru/b/boris-i-k/sajanges-rassledovanie.shtml/>

Рецензія/Peer review : 27.3.2019 р.

Надрукована/Printed : 11.4.2019 р.

Рецензент: д. т. н., проф. Олександренко В. П.

За зміст повідомлень редакція відповідальності не несе

Повні вимоги до оформлення рукопису **<http://vestnik.ho.com.ua/rules/>**

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради Хмельницького національного університету,
протокол № 9 від 28.03.2019 р.**

Підп. до друку 29.03.2019 р. Ум.друк.арк. 38,22 Обл.-вид.арк. 42,47
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № _____

Тиражування здійснено з оригінал-макету, виготовленого
редакцією журналу “Вісник Хмельницького національного університету”
редакційно-видавничим центром Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63