

И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, ул. Лысогорская, 12, корп. 106, Киев, 03028, Украина*

### НЕИЗВЕСТНЫЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

Представлены результаты комплексного анализа истинных причин ядерной катастрофы на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС в 1986 г. Выполнена систематизация хронологии возникновения и развития аварийной ситуации. В контексте анализа аварийной динамики реактора рассмотрен комплекс определяющих физических, технических, диагностических и политических факторов, которые обусловили фатальный характер этой ядерной катастрофы.

*Ключевые слова:* Чернобыльская катастрофа, анализ динамики развития.

Результаты комплексного анализа истинных причин запроектной аварии, произошедшей на энергоблоке № 4 Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) три десятилетия тому назад, а также систематизация хронологии возникновения и развития аварийной ситуации совместно с оценкой фактической значимости определяющих технических, экономических и политических факторов, которые непосредственно предопределили фатальный характер этой ядерной катастрофы, не потеряли своей остроты и в настоящее время в силу следующих, связанных с ними, актуальных проблем безопасности ядерных энергоблоков.

Во-первых, эти результаты принципиально могут быть использованы для предотвращения возможности повторения (пусть даже в существенно меньших масштабах) подобных аварий в атомной энергетической отрасли Украины. Во-вторых, рассматриваемые далее неизвестные диагностические аспекты чернобыльской катастрофы иллюстрируют высокую эффективность принципиально нового поколения технических средств оперативной диагностики активных зон (АкЗ) [1] и способны стимулировать широкое внедрение нейрокompьютерных диагностических комплексов. В-третьих, эти данные служат наглядной иллюстрацией неразрывной взаимосвязи нейтронных и теплофизических процессов в АкЗ ядерных реакторов (ЯР). Последнее обстоятельство диктует необходимость неотложного пересмотра существующих программ подготовки специалистов по специальности «Атомная энергетика» для атомной энергетики Украины и неотложной гармонизации этих программ с директивными документами МАГАТЭ по безопасности АЭС и соответствующими стандартами Европейского Союза, а также учебными планами ведущих технических университетов мира. Способствовать практическому решению вышеуказанных актуальных задач призвана также и настоящая публикация.

Как известно, серьезными недостатками реакторов РБМК являются присущие им положительный паровой коэффициент реактивности, а также пространственная неустойчивость нейтронного потока. В первом поколении этих реакторов система управления и защиты (СУЗ) реактора включала в себя 211 стержней-поглотителей, которые при срабатывании аварийной защиты (АЗ-5) вводились в АкЗ со скоростью 0,4 м/с. Кроме того, предписанный (уже только после анализа причин произошедшей аварии на ЧАЭС) минимально допустимый запас реактивности для ЯР РБМК-1000 был увеличен до 30 стержней.

Известно, что при проектировании АкЗ ЯР РБМК разработчики стремились к максимальной эффективности использования ядерного топлива за счет выбора такого уран-графитового соотношения, которое позволяет применять уран низкого обогащения. При таком уран-графитовом соотношении обеспечивается максимальный коэффициент размножения в сухой уран-графитовой решетке. Именно оптимальная величина уран-графитового соотношения обусловила примененный шаг решетки 250 × 250 мм и диаметр технологических каналов (ТК)  $d = 80$  мм. Важнейшим конструктивным просчетом, допущенным при проектировании исполнительных органов СУЗ явилось то, что длины как поглотителя (6,2 м), так и вытеснителя (4,6 м) были меньше высоты АкЗ (7 м). В результате при опускании стержней по каналам СУЗ из крайнего верхнего положения столб воды (как известно, вода поглощает тепловые нейтроны более эффективно, чем графит) в нижней части каналов СУЗ заменялся вытеснителем, что инициировало появление положительной, а не отрицательной реактивности, которая должна быть обеспечена при введении в АкЗ стержней СУЗ. В наибольшей мере это проявляется, если поле энерговыделения смещено в нижнюю часть АкЗ. Кроме того, в РБМК-1000 недостаточной была также скорость ввода органов СУЗ в АкЗ.

© И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский, 2016

Таким образом, отмеченные выше негативные особенности протекания нейтронно-физических процессов, которые органически присущие данному типу ЯР, грубые конструктивные просчеты при проектировании исполнительных органов СУЗ, а также ряд ошибок, допущенных оперативным персоналом, привели к запроектной аварии, последствия которой усугубились отсутствием защитной оболочки. Для отвода остаточного тепловыделения ЯР РБМК предназначена система аварийного охлаждения реактора (САОР), подающая при авариях, требующих интенсивного охлаждения АкЗ, необходимое количество воды в ТК. В САОР могут вводиться при необходимости поглотители нейтронов. Система защиты от превышения давления в реакторном пространстве при аварийных ситуациях обеспечивает отвод части возникающего пара в бассейн-барботер для его конденсации.

Как известно, авария произошла в процессе планового останова энергоблока на средний ремонт. К моменту останова АкЗ содержала 1659 тепловыделяющих сборок (ТВС) со средним выгоранием 10,3 МВтж/кг, 1 дополнительный поглотитель и 1 незагруженный канал. Основную часть ТВС (75 %) составляло топливо первой загрузки с выгоранием 12 - 15 МВтж/кг. С процессом останова были совмещены плановые испытания одного из турбогенераторов в режиме выбега с нагрузкой собственных нужд. Целью этих испытаний была экспериментальная проверка возможностей использования механической энергии ротора останавливающегося турбогенератора для электроснабжения механизмов собственных нужд, прежде всего главных циркуляционных насосов (ГЦН) и насосов аварийного охлаждения, в условиях полного обесточивания АЭС. Такое использование энергии выбега ротора позволяет сохранить электропитание до запуска резервных источников электропитания. Подобные испытания не являлись уникальными и не впервые проводились на ЧАЭС.

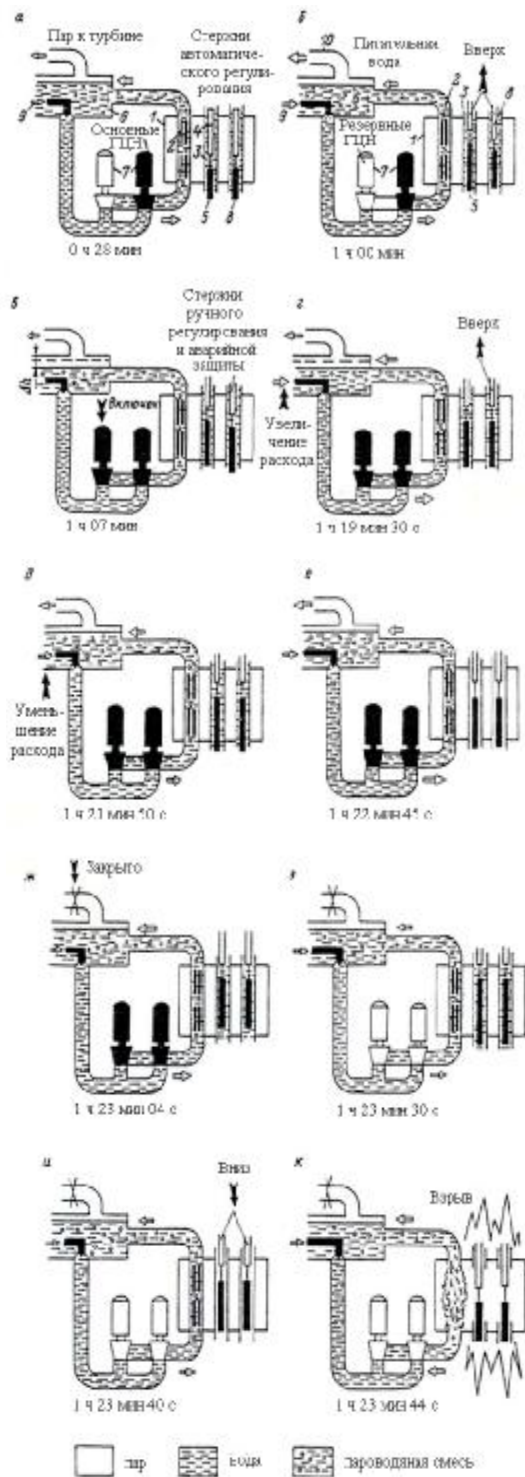
В то же время уже на стадии разработки программы был допущен ряд ошибок. Одна из них состояла в том, что эксперимент сочли чисто электротехническим, не влияющим на ядерную безопасность ЯР. Вследствие этого не было уделено должного внимания безопасности ЯР в процессе испытаний. Программой не только не были предусмотрены дополнительные меры безопасности, но даже снижены существующие штатные меры. Так, программой предписывалось отключение САОР на весь период испытаний (более 4 ч). Это связано с тем, что при разработке программы испытаний предполагалось, что при падении тепловой мощности ЯР до 700 - 1000 МВт будет прекращена подача пара ко второй турбине и начнется выбег турбогенератора. Чтобы исключить срабатывание САОР в ходе эксперимента, программа предусматривала ее отключение, а электрическую нагрузку насосов САОР имитировать подключением к турбогенератору двух ГЦН в дополнение к шести, работавшим до того. Этот пункт программы содержит сразу две ошибки. Во-первых, отключение САОР было обязательным для достижения цели испытаний. Во-вторых, и это главное, подключение дополнительных ГЦН к останавливающемуся генератору усилило связь, казалось бы, чисто электротехнического эксперимента с нейтронно-физическими процессами в ЯР.

25 апреля в 01 ч персонал приступил к снижению мощности ЯР, работавшего в номинальном режиме. В 13 ч 05 мин при тепловой мощности ЯР 1600 МВт был отключен от сети первый турбогенератор. Электропитание системы собственных нужд (4 ГЦН, 2 питательных электронасоса и др.) было переведено на шины оставшегося в работе турбогенератора. В 14 ч в соответствии с программой испытаний была отключена САОР. Однако по требованию диспетчера энергосистемы дальнейшее снижение мощности было задержано, и более 9 ч ЯР в нарушение регламента эксплуатации работал при половинной мощности с отключенной САОР.

Во время работы с половинной мощностью происходил процесс нестационарного ксенонового отравления ЯР. Компенсация обусловленной этим отрицательной реактивности, необходимая для поддержания мощности неизменной, производилась выдвижением из АкЗ стержней-поглотителей СУЗ, что последовательно уменьшало оперативный запас реактивности. В 23 ч 10 мин, т. е. в момент, соответствующий максимальной глубине йодной ямы, снижение мощности блока было продолжено.

Хронология развития аварии на энергоблоке № 4 ЧАЭС представлена на рис. 1.

**Развитие аварийного режима.** Программой испытаний было предусмотрено провести испытания с выбегом турбогенератора, сохранявшего нагрузку собственных нужд при тепловой мощности ЯР 700 - 1000 МВт. Однако после отключения системы локального автоматического регулирования, в 0 ч 28 мин 26 апреля (см. рис. 1, а), производившегося в соответствии с регламентом эксплуатации ЯР при малой мощности, оператору не удалось достаточно быстро устранить возникший при этом дисбаланс измерительной части автоматических регуляторов, в результате чего тепловая мощность реактора снизилась до 30 - 40 МВт. В течение всего этого времени продолжалось нестационарное ксеноновое отравление, что уменьшило оперативный запас реактивности до уровня, равного 15 стержням.



Чтобы вернуть ЯР к мощности, предусмотренной программой испытаний, начали выводить оставшиеся стержни СУЗ из АкЗ. В результате к часу ночи 26 апреля 1986 г. была достигнута тепловая мощность ~ 200 МВт. При этом часть стержней СУЗ оказалась в крайнем верхнем положении, а часть - в крайнем нижнем.

Состояние ЯР и контура многократной принудительной циркуляции (КМЦ) в моменты 0 ч 28 мин и 1 ч 00 мин иллюстрируется рис. 1, а и б. В соответствии с программой испытаний к шести работавшим ГЦН дополнительно были подключены еще два (см. рис. 1, в). Одна из целей подключения состояла в том, чтобы по окончании эксперимента, в котором в режиме выбега должны были работать четыре ГЦН, после их полного останова в работе остались еще четыре ГЦН, которые охлаждали бы АкЗ. Однако в момент подключения ГЦН уровень тепловой мощности ЯР был существенно ниже предусмотренного программой. Как было установлено впоследствии при анализе аварии, эксплуатация ЯР типа РБМК при восьми работающих ГЦН (при увеличенном расходе теплоносителя через АкЗ) является потенциально опасной. Вследствие того, что суммарный расход воды превысил допустимый для такой мощности предел, уменьшилось парообразование в ТК, стало снижаться давление в барабанах-сепараторах, уровень в них понизился на величину  $\Delta h$  (исходный уровень указан на рис. 1, в штриховой линией). Попытки персонала вручную поддерживать эти параметры, увеличив подачу питательной воды (см. рис. 1, г), не увенчались успехом. Чтобы не допустить останова ЯР, персонал заблокировал сигналы АЗ по давлению и уровню в барабанах-сепараторах, отключив еще одну систему обеспечения безопасности. Уменьшение парообразования на этом этапе развития аварийного режима вносило отрицательную реактивность, что приводило к еще большему выдвиганию вверх стержней АЗ.

Рис. 1. Развитие аварийного режима на 4-м энергоблоке ЧАЭС: а - 0 ч 28 мин 26 апреля 1986 г.; б - 1 ч 00 мин; в - 1 ч 07 мин; г - 1 ч 19 мин 30 с; д - 1 ч 21 мин 50 с; е - 1 ч 22 мин 45 с; ж - 1 ч 23 мин 04 с; з - 1 ч 23 мин 30 с; и - 1 ч 23 мин 40 с; к - 1 ч 23 мин 44 с; 1 - графитовая кладка ЯР; 2 - ТК с ТВЭЛ; 3 - канал со стержнями-поглотителями; 4 - стержень автоматического регулирования; 5 - графитовый вытеснитель; 6 - барабан-сепаратор; 7 - ГЦН; 8 - стержни СУЗ.

В 1 ч 19 мин 30 с (см. рис. 1, г) уровень воды в барабанах-сепараторах, пониженный ранее на  $\Delta h$ , начал расти. Из-за притока относительно холодной питательной воды в АкЗ там практически прекратилось парообразование, что непосредственно приблизило исходное аварийное событие. Как известно, при малом количестве пара в ТК образование 1 % пара по массе увеличивает объемное паросодержание на 20 %, что превышает обычную долю пара в каналах, создавая ситуацию, когда вклад парового эффекта реактивности может оказаться столь большим, что обусловит саморазгон ЯР на мгновенных нейтронах. В этой ситуации оперативный запас реактивности (как результат предыдущих действий оператора) оказался критически недостаточным. При этом в 1 ч 19 мин 58 с давление продолжало падать, что и привело к закрытию клапана БРУ-К. Последнее несколько замедлило падение давления, но не остановило его.

В 1 ч 21 мин 50 с (см. рис. 1, д) уровень воды в барабанах-сепараторах значительно повысился. Так как это было достигнуто четырехкратным увеличением расхода питательной воды, оператор резко сократил ее подачу. В 1 ч 22 мин 10 с в контур стало поступать меньше недогретой воды, что несколько усилило парообразование, стабилизировав уровень в барабанах-сепараторах. При этом, естественно, высвободилась положительная реактивность, которая, однако, была оперативно скомпенсирована стержнями автоматического регулирования. В 1 ч 22 мин 30 с расход питательной воды снизился в большей мере, чем требовалось (до двух третей нормального расхода). Этого не удалось предотвратить из-за недостаточной эффективности системы управления, не предназначенной для такого нерегламентного режима. В 1 ч 22 мин 30 с на распечатке информационно-измерительной системы появилась информация, что оперативный запас реактивности, по меньшей мере, вдвое ниже минимального значения, требующего немедленного останова ЯР. Однако персонал, решавший задачу стабилизации ЯР, по-видимому, просто не успел ознакомиться с этими данными.

В 1 ч 22 мин 45 с расход питательной воды и паросодержание в ТК наконец стабилизировались, а давление стало медленно повышаться (см. рис. 1, е). Решив, что ЯР возвратился в стабильный режим, персонал начал испытания. В 1 ч 23 мин 04 с (см. рис. 1, ж) были закрыты стопорно-регулирующие клапаны второй турбины. Имевшаяся АЗ ЯР, которая должна была немедленно остановить его по факту закрытия стопорных клапанов обеих турбин, была заблокирована персоналом, чтобы иметь возможность повторить испытания, если первая попытка окажется неудачной, хотя программой испытаний, не говоря уже о регламенте эксплуатации, такая блокировка не предусматривалась. Из-за блокировки АЗ ЯР продолжал работать с тепловой мощностью около 200 МВт. Закрытие клапанов турбины привело, с одной стороны, к повышению давления в барабанах-сепараторах, а с другой - к уменьшению подачи воды в ЯР, так как четыре из восьми ГЦН получали электропитание от останавливающегося турбогенератора. В результате взаимодействия этих противоположно направленных факторов высвободилась положительная реактивность, вследствие чего начала повышаться тепловая мощность ЯР (см. рис. 1, з). Через 3 с она превысила 530 МВт, а период ЯР стал намного меньше 20 с. Положительный паровой коэффициент реактивности способствовал неблагоприятному развитию аварийного режима. Лишь эффект Доплера в некоторой мере компенсировал непрерывно высвобождавшуюся положительную реактивность.

Только в этот момент персонал осознал меру опасности, и в 1 ч 23 мин 40 с начальник смены дал команду нажать кнопку АЗ-5 (см. рис. 1, и), по сигналу которой в АкЗ вводятся все регулирующие стержни и стержни АЗ. Это было последней попыткой предотвратить аварию, последним действием персонала до взрыва и последней из множества вызвавших его причин. Каждый из стержней-поглотителей СУЗ имеет расположенный ниже его вытеснитель - алюминиевый цилиндр, заполненный графитом, поглощающий нейтроны в значительно меньшей мере, чем вода. Когда стержень СУЗ находится в верхнем положении, нижний конец вытеснителя поднят на 1,25 м выше нижней границы АкЗ. В самой нижней части каналов СУЗ находилась вода, почти не содержащая пара. По команде АЗ-5 исполнительные органы СУЗ начали входить в верхнюю часть АкЗ, еще практически не внося отрицательной реактивности. Вытеснители же, пройдя при этом всю нижнюю часть АкЗ и вытеснив из каналов СУЗ находившуюся там воду, внесли положительную реактивность. При проектировании ЯР и выборе конструкции стержней СУЗ и вытеснителей считалась невероятной работа ЯР в условиях, когда практически все стержни и связанные с ними вытеснители одновременно пойдут вниз из крайнего верхнего положения.

Введение большой положительной реактивности под действием вытеснителей привело к скачкообразному росту мощности ЯР и интенсивному парообразованию. Стержни СУЗ остановились, пройдя лишь два-три метра. Оператор обесточил муфты сервоприводов, чтобы стержни упали в АкЗ под действием собственной тяжести. Однако это не дало эффекта. Под влиянием нарастающей положительной реактивности начался саморазгон ЯР на мгновенных нейтронах. К 1 ч 23 мин 44 с (см. рис. 1, к) мощность цепной реакции в 100 раз превысила номинальную. Продолжавшееся снижение расхода воды в ТК при непрерывно нарастающей тепловой мощности ЯР сопровождалось интенсивным парообразованием, а затем кризисом теплоотдачи, разогревом топлива и его разрушением. Бурное вскипание теплоносителя, в который попали частицы разрушенного топлива, привело к резкому повышению давления в ТК, их разрыву и взрыву, разрушившему ЯР. Следствием этого явился выброс активных продуктов деления во внешнюю среду. Парообразование и резкое повышение температуры в АкЗ создали условия для возникновения парациркониевой и других химических экзотермических реакций. Спустя 2 с после первого взрыва произошел второй, причиной которого, по мнению многих специалистов, было образование смесей кислорода с водородом и оксидом углерода. При

этом разрушилась часть здания реакторного отделения, наружу было выброшено из ЯР около четверти графита и часть топлива. В этот момент цепная реакция прекратилась. Очевидцами наблюдалось проявление химических реакций в виде фейерверка вылетающих из ЯР раскаленных и горячих фрагментов. Часть их, упав на крышу машинного зала, вызвала пожар.

С момента аварии не прекращается дискуссия о природе взрывов на ЧАЭС. Взрывы принято классифицировать по природе запасенной энергии и механизму ее быстрого высвобождения. При химических взрывах высвобождается энергия межатомных связей, при ядерных - энергия атомного ядра. По механизму высвобождения энергии взрывы разделяют на тепловые и цепные. При тепловых взрывах высвобождение энергии связано с температурой: чем больше высвобождается энергии, тем большей становится температура, а ее рост, в свою очередь, способствует дальнейшему высвобождению энергии. При цепных взрывах энергия высвобождается элементарными актами, каждый из которых инициирует несколько новых посредством выделения нескольких нейтронов в исходном акте.

Авария на ЧАЭС, связанная с совокупностью разнородных процессов, не поддается элементарной классификации. Второй самый мощный и разрушительный взрыв был типично химическим. По природе запасенной энергии первый взрыв следовало бы отнести к ядерным, так как при саморазгоне ЯР выделялась энергия деления ядер урана. По механизму же высвобождения энергии взрыв был тепловым, обусловленным тем, что система охлаждения ЯР не справилась с отводом теплоты, вследствие чего увеличилось объемное паросодержание. Но в этом механизме присутствуют элементы ядерного взрыва, так как положительная обратная связь по тепловыделению замыкалась через паровой эффект реактивности и цепной процесс деления урана, причем роль этого эффекта резко возросла в период разгона ЯР на мгновенных нейтронах.

Наконец, по поражающим факторам авария на ЧАЭС имела два, присущих ядерным взрывам, - проникающую радиацию и радиоактивное заражение, но в ней не было двух других, характерных для ядерных взрывов, факторов - ударной волны и светового излучения. Принципиальное отличие Чернобыльской аварии от взрыва ядерного боеприпаса состоит в том, что во втором случае радиоактивные осколки рождаются в момент взрыва, в Чернобыльской же аварии были выброшены радиоактивные продукты деления, накопившиеся под оболочками ТВЭЛ за весь период нормальной работы ЯР с начала топливной кампании. Вследствие этого, уступая более чем на пять порядков хиросимскому взрыву по энергии механических разрушений, Чернобыльская авария превосходит его более чем на два порядка по радиоактивному заражению долгоживущими нуклидами.

В связи с изложенным неправомерно без дополнительных уточнений называть Чернобыльскую аварию ядерным взрывом, а тем более проводить аналогию между Чернобылем и Хиросимой. Вместе с тем нельзя категорически отрицать присутствие в механизме ее развития элементов ядерной природы взрыва.

Таким образом, авария на четвертом блоке ЧАЭС относится к классу аварий, связанных с вводом избыточной реактивности. При этом авария обусловлена наложением нескольких причин. Во-первых, перед нажатием оператором кнопки аварийной остановки ЯР АЗ-5 РУ находилась в состоянии физической и теплогидравлической нестабильности. В условиях развивающегося ксенонового отравления ЯР, приведшего к практическому исчерпанию оперативного запаса реактивности, а также при практически нулевом недогреве теплоносителя на входе в АкЗ, достаточно было любого возмущающего фактора, чтобы нарушить это неустойчивое состояние. Во-вторых, непосредственным импульсом для возникновения аварии явилось нажатие кнопки АЗ-5, в силу чего из-за ошибочной конструкции управляющих стержней в нижнюю часть ЯР была введена положительная реактивность и начался разгон мощности. В-третьих, этот разгон принял катастрофический масштаб из-за большого (около  $5b_{эф}$  в данном случае) парового коэффициента реактивности, который присущ реакторам РБМК и влияние которого особенно велико на начальном этапе парообразования в АкЗ. Иными словами, непосредственными причинами аварии явились нейтронно-физические и конструктивные особенности ЯР РБМК, реализации которых способствовали ошибочные действия персонала.

Подобная точка зрения изложена в докладе комиссии Госпроматомнадзора СССР [2]. Практически к аналогичным выводам пришли авторы доклада INSAG - международной группы экспертов по ядерной безопасности при генеральном директоре МАГАТЭ [3]. Более того, результаты работы специалистов из организации, разработавшей ЯР РБМК-1000, опубликованные в 1993 г., позволили подвести итог дискуссии о реальных технических причинах аварии. В частности, в работе [4] неопровержимо доказано, что именно в силу недопустимо высокого значения парового эффекта реактивности и несовершенства системы АЗ-5 даже проектная авария - разрыв напорного коллектора - на малой мощности приводит к разрушению РУ. На основе этих данных уже после произошедшей катастрофы

был реализован комплекс мероприятий, гарантирующих невозможность развития максимальной проектной аварии в практически используемом диапазоне мощностей. Следует еще раз подчеркнуть, что именно РБМК-1000 первого поколения в силу несовершенства своих проектных характеристик отличался высоким риском развития ядерной катастрофы, которая и произошла вследствие крайне неблагоприятного сочетания комплекса потенциально опасных предаварийных состояний 26 апреля 1986 г.

Что касается действий персонала, споры о которых продолжаются до сегодняшнего дня, то мы хотели бы еще раз сослаться на анализ этой проблемы, выполненный в докладе комиссии Госпромомнадзора СССР [2]. Да, персонал совершил ряд ошибок, но степень его вины была сознательно (подчеркнем это слово) преувеличена в официальном докладе, представленном СССР в МАГАТЭ в 1986 г. [5], по результатам обсуждения которого INSAG выпустила свой первый доклад [6]. Такова была установка высшего политического руководства страны, инициированная руководством советского ядерного ведомства. Недостатки ЯР типа РБМК были известны задолго до аварии. Это неопровержимый факт, который многократно подтвержден документально. Так, например, существовали даже планы модернизации конструкции стержней управления и модернизация этих реакторных установок в целом. Однако они практически не реализовывались.

Вместе с тем некоторые документы, раскрывавшие указанные недостатки, доходили, по крайней мере, до руководства АЭС с ЯР типа РБМК. В частности, положительный выбег реактивности при вводе стержней в АкЗ ЯР экспериментально был зафиксирован в декабре 1993 г. при пусковых испытаниях блока № 1 Игналинской АЭС и блока № 4 ЧАЭС. Этот эффект и его возможные последствия для безопасности стали предметом обсуждения между Институтом атомной энергии им. И. В. Курчатова (научный руководитель проекта РБМК) и Научно-исследовательским институтом энерготехники НИКИЭТ (главный конструктор РБМК). «...В общем случае можно показать (основываясь на данных, приведенных выше), что положительный выбег реактивности при срабатывании АЗ происходит, когда количество полностью извлеченных стержней больше 130 и аксиальный коэффициент неравномерности энерговыделения  $K_z > 1,7...$ » и, далее, «при снижении мощности до 50 %... запас реактивности уменьшается за счет отравления и возникнут перекосы высотного поля до  $K_z > 1,9$ . Срабатывание АЗ-5 в таком случае может привести к выделению положительной реактивности» [7]. Научный руководитель предположил, что «более тщательный анализ позволит выявить и другие опасные ситуации» и предложил ряд практических мер, чтобы их предотвратить. В ответе главного конструктора [8], который был направлен руководителям всех АЭС с ЯР РБМК и в вышестоящие организации, сообщалось, что «...мы имеем дело с известным явлением...». Кроме того, сообщалось, что известны и меры по ликвидации опасных явлений.

В связи с изложенным представляется необходимым дополнительно рассмотреть недостаточно известные диагностические, а также теплофизические аспекты запроектной аварии на энергоблоке № 4 ЧАЭС, а также проанализировать эти аспекты в их взаимосвязи с нейтронно-физическими особенностями энергетических ЯР с графитовым замедлителем и канальной структурой АкЗ. В контексте указанного анализа следует подчеркнуть, что реактор РБМК-1000 энергоблока № 4 26 апреля 1986 г. непосредственно перед аварией, возникновение и развитие которой инициировала именно начальная фаза срабатывания АЗ-5 (ЯР, таким образом, был не остановлен, а приведен в аварийный режим неконтролируемого нарастания мощности), физически находился в состоянии развивающегося ксенонового отравления. Последнее привело к практическому исчерпанию оперативного запаса реактивности. Кроме того, в предаварийном теплогидравлическом режиме ЯР находился при той величине недогрева теплоносителя на входе в АкЗ, которая была близка к нулевому значению. Это обстоятельство существенно облегчало вскипание теплоносителя даже при незначительном всплеске мощности АкЗ.

В настоящее время можно считать окончательно установленным [2 - 4, 9 и др.], что именно вскипание теплоносителя в нижней части АкЗ в условиях срабатывания аварийной защиты «АЗ-5» при эксплуатации РБМК-1000 энергоблока № 4 непосредственно перед его остановом 26 апреля 1986 г. на малом (6 - 8 %) уровне мощности явилось исходным событием всего последовавшего за этим вскипанием аварийного переходного процесса. Как следует из представленных в [2, 3] данных, именно вскипание теплоносителя в указанных условиях, а также последовавшие за этим вскипанием разгон реактора на мгновенных нейтронах, кризис теплоотдачи 2-го рода, который в свою очередь инициировал возникновение парциркуляционной реакции с образованием большого количества водорода, взрыв этого водорода и разрушение всего реакторного отделения энергоблока, обусловили катастрофические последствия этой аварии. Как отмечено выше, инициирующая роль процесса генерации паровой фазы в нижней части АкЗ при срабатывании «АЗ-5» подтверждается, в частности, результа-

тами детального анализа аварийной динамики РБМК-1000, который был выполнен через семь лет после аварии специалистами из организации главного конструктора этих канальных ЯР в работе [4]. Авторы этого исследования убедительно показали, что в силу большого парового коэффициента реактивности (до  $5b_{эф}$ ), а также недостаточного быстродействия АЗ (скорость перемещения 0,4 м/с) даже такая предусмотренная проектом этого реактора аварийная ситуация, как разрыв одного напорного коллектора реактора, произошедший на уровне мощности ЯР ниже 40 % от номинального значения, приводит к разрушению АкЗ. Оценивая характеристики безопасности РБМК-1000 в указанный доаварийный период, следует еще раз обратить внимание на конструктивные просчеты, допущенные при проектировании управляющих стержней этого реактора с поглотителем из карбида бора, которые были снабжены укороченными (по отношению к полной высоте АкЗ) графитовыми вытеснителями [10]. Главный недостаток указанной конструкции, как теперь установлено [2 - 4, 9 и др.], состоял именно в том, что при поднятом поглощающем стержне каждый из таких вытеснителей общей длиной 4,5 м оставлял незаполненными участки канала СУЗ по 1,25 м в его верхней и нижней частях.

С учетом вышеуказанных физических и конструктивных особенностей РБМК-1000 непосредственным импульсом для возникновения аварии явилось именно нажатие оператором реактора на энергоблоке № 4 ЧАЭС 26 апреля 1986 г. кнопки АЗ-5. Следует подчеркнуть, что введение стержней АЗ-5 в АкЗ и последовавший за началом этого процесса неконтролируемый разгон ЯР произошел при весьма неблагоприятных для этого типа реакторов физических факторах. В первую очередь в их числе необходимо отметить следующие: а) малый оперативный запас реактивности, составлявший восемь находившихся в АкЗ стержней; б) близкий к нулевому входной недогрев теплоносителя; в) низкий (порядка 6...7 %) уровень мощности ЯР.

В указанных конкретных ядерно-физических и теплогидравлических условиях разгон ЯР на мгновенных нейтронах фактически был обусловлен вышеуказанной ошибочной конструкцией стержней СУЗ - наличием укороченного (не достигающего по высоте на 1,25 м до нижнего торца АкЗ во взведенном состоянии поглощающего стержня) графитового вытеснителя, начальная фаза движения которого в течение первых пяти секунд приводила к вытеснению воды в нижних частях каналов СУЗ и, следовательно, обуславливала внесение положительной реактивности в нижнюю часть АкЗ. Напротив, при наличии достаточно большого оперативного запаса реактивности имеют место принципиально иные физические условия, которые состоят в следующем. При срабатывании АЗ-5 определенная часть стержней СУЗ начинает свое движение не из верхнего, а из промежуточного положения по высоте АкЗ, непрерывно внося по мере своего движения отрицательную реактивность. Тем самым создаются условия для подавления очагов вскипания теплоносителя, которые могли локально возникнуть в течение первых секунд срабатывания АЗ-5 в той части АкЗ, в которой стержни СУЗ начинали свое движение из верхнего положения. Следует подчеркнуть, что вероятность возникновения аварийного разгона РБМК-1000 первого поколения, который обладал недопустимо высоким значением положительного парового коэффициента реактивности, а также вышеуказанной ошибочной конструкцией стержней СУЗ, резко возростала именно в режимах останова этого ЯР, т.е. при низких уровнях мощности и возможном малом запасе реактивности.

Ниже приводятся результаты исследования аномальных и предаварийных теплогидравлических процессов в ТК ЯР типа РБМК-1000 того же, что и аварийный реактор, первого поколения. Так, спектр № 4 автоспектральной плотности (АСП) акустического шума в ТК на рис. 2, зарегистрированный одним из авторов настоящей статьи в 1978 г. на энергоблоке № 1 ЧАЭС, т.е. почти за 8 лет до аварии 26 апреля 1986 г., иллюстрирует именно такой предаварийный эксплуатационный режим. Спектры № 1...3, которые получены в ТК 42-40 этого ЯР уже после срабатывания АЗ-5 и соответствуют режиму расхолаживания ЯР, зарегистрированы в трех спектральных диапазонах:  $f = 0,02...0,5$  кГц (спектр № 1);  $f = 0,02...2,0$  кГц (спектр № 2);  $f = 0,02...5,0$  кГц (спектр № 3). Как следует из этих экспериментальных данных [1], низкочастотный шумовой фон насосной группы ГЦН реактора типа ЦВН-7 отчетливо виден на каждом из представленных спектров. Отсутствие шумовых спектральных компонент в полосе частот  $f = 200...400$  Гц свидетельствует об отсутствии процесса генерации паровой фазы на теплоотдающей поверхности ТВЭЛ. В то же время спектр № 4 на рис. 2, в котором такие спектральные составляющие присутствуют (спектр № 4 зарегистрирован в спектральном диапазоне  $f = 0,02...0,5$  кГц в первые секунды после срабатывания АЗ-5, т.е. именно в режиме останова ЯР) свидетельствует о наличии кипения теплоносителя в ситуации, которая в значительной мере напоминает аварийный переходной процесс 26 апреля 1986 г. на блоке № 4 ЧАЭС. Вскоре после получения вышеуказанных экспериментальных данных об аномальном вскипании теплоносителя в канале РБМК-1000 в режиме его останова эти материалы были доложены в том же 1978 г. в НИКИЭТ.



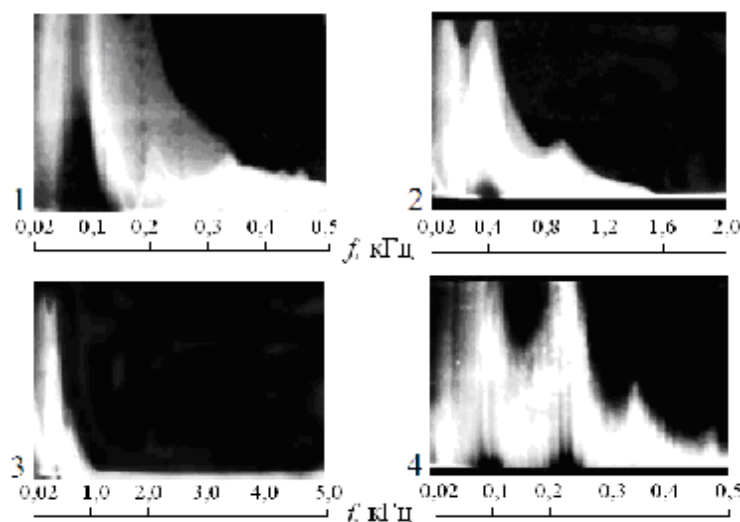


Рис. 2. Сравнение частотных структур АСП акустического шума, зарегистрированного в условиях отсутствия кипения в ТК реактора РБМК-1000 (спектры № 1...3, измеренные в спектральных диапазонах 0,5; 2,0; 5,0 кГц) и в режиме генерации паровой фазы в результате срабатывания защиты АЗ-5 (спектр № 4).

Авария на ЧАЭС потребовала принятия комплекса организационных и технических мер по повышению безопасности всех типов АЭС. Применительно к ЯР РБМК нового поколения была существенно уменьшена положительная обратная связь, обусловленная паровым коэффициентом реактивности. Он снижен от (5 - 6) до (0,7 - 0,8) установкой в АкЗ дополнительных поглотителей (80 в РБМК-1000 и 55 в РБМК-1500), увеличением оперативного запаса реактивности с 30 до 43 - 48 стержней в РБМК-1000 и 53 - 58 стержней в РБМК-1500, увеличением обогащения топлива от 2 до 2,4 %. Конструкция стержней СУЗ изменена так, что в извлеченном состоянии нижний конец вытеснителя располагается на уровне нижнего торца АкЗ, и тем самым была ликвидирована возможность ввода положительной реактивности при опускании стержней из крайнего верхнего положения. Длина поглощающей части стержня увеличена до 6,8 м. Изменением системы электродинамического торможения время ввода стержней СУЗ в АкЗ сокращено с 18 до 12 с. При этом часть стержней СУЗ переведена в режим АЗ-5, что сократило время аварийного останова ЯР до 2 - 2,5 с. Введена автоматическая АЗ ЯР, предусматривающая его заглушение по факту уменьшения запаса реактивности ниже предельного допустимого значения.

Эти меры исключают возможность неуправляемого разгона ЯР даже при ошибочных действиях персонала. Разработан также ряд организационно-технических мероприятий для предотвращения аварийных ситуаций, в их числе: самоподхват сигнала АЗ-5 до полного ввода стержней в АкЗ; предотвращение кавитационного срыва ГЦН и вскипания теплоносителя при входе в АкЗ снижением расхода теплоносителя при тепловой мощности ЯР 700 МВт; циклический расчет текущего значения оперативного запаса реактивности и требование заглушения ЯР при снижении запаса реактивности до 30 стержней; определение перечня АЗ, отключение которых запрещено при всех режимах, требование об обязательном присутствии главного инженера АЭС или его заместителя по науке и инспектора Госатомнадзора при выводе ЯР на мощность и др. Было начато сооружение защитной оболочки над реакторами РБМК.

В результате проведенной реконструкции радиоактивные выбросы в атмосферу сокращены для РБМК-1000 до 22 Ки на один ЯР в сутки, а следующим этапом было предусмотрено их снижение до 1,5 Ки. В целом совокупность этих мер обеспечила безопасность работы АЭС с реакторами РБМК и снизила риск от их эксплуатации.

Как свидетельствуют результаты наших исследований, безопасность эксплуатации водоохлаждаемых ЯР основных энергетических типов может быть существенно повышена на основе применения нового поколения диагностических средств [1]. Предлагаемые и уже реализованные на ряде ядерных объектов математические модели автоматической оперативной диагностики теплогидравлических процессов в АкЗ ЯР, а также созданные методы распознавания в реальном времени режимов течения двухфазных потоков теплоносителя и программно-технические компьютерные комплексы для их реализации способны обеспечить необходимый для безопасности АЭС уровень теплогидравлической надежности и продление ресурса оборудования ядерных энергоблоков. Эти результаты составляют необходимую научную и технологическую основу для широкого внедрения на энергоблоках АЭС Украины интеллектуальных диагностических средств нового поколения.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шараєвський І. Г.* Розпізнавання передаварійних теплогідравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. - К.: ПБ АЕС НАН України, 2010. - 48 с.
2. *О причинах и обстоятельствах аварии на 4 блоке Чернобыльской АЭС 26 апреля 1986 года: Доклад комиссии Государственного комитета СССР по надзору за безопасным ведением работ в промышленности и атомной энергетике.* - М., 1991.
3. *INSAG-7. Чернобыльская авария. Дополнение к INSAG-1: Доклад международной группы по ядерной безопасности.* – Сер. изданий по безопасности № 75-INSAG-7. – Вена: МАГАТЭ, 1992.
4. *Миронов Ю. В., Никитин Ю. М., Фомичева Т. И., Доморадов Е. А.* Анализ динамики РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой мощности // Атомная энергия. - Август 1993. - Т. 75, вып. 2.
5. *Авария на ЧАЭС и ее последствия. Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ.* - Вена, 25 - 29 августа 1986 г. - Ч. 1 и 2 / ГКАЭ СССР. - 1986.
6. *INSAG-1. Итоговый доклад о Совещании по рассмотрению причин и последствий аварии в Чернобыле: Доклад международной группы по ядерной безопасности.* – Сер. изданий по безопасности № 75-INSAG-1. – Вена: МАГАТЭ, 1986.
7. *Письмо п/я А-1758 № 033-08/67 от 23.12.1983.*
8. *Письмо п/я А-7291 № 050-01/1-120 от 02.02.1984.*
9. *Самойлов О. Б., Усынин Г. Б., Бахметьев А. М.* Безопасность ядерных энергетических установок: учеб. пособие для вузов / Под ред. Л. С. Стермана. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 280 с.
10. *Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я.* Канальный ядерный энергетический реактор. - М.: Атомиздат, 1980. - 208 с.

**І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін, Г. І. Шараєвський**

*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України*

### НЕВІДОМІ ДІАГНОСТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАПРОЕКТНОЇ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

Представлено результати комплексного аналізу справжніх причин ядерної катастрофи на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС у 1986 р. Виконано систематизацію хронології виникнення та розвитку аварійної ситуації. У контексті аналізу аварійної динаміки реактора розглянуто комплекс визначальних фізичних, технічних, діагностичних та політичних факторів, які обумовили фатальний характер цієї ядерної катастрофи.

*Ключові слова:* Чорнобильська катастрофа, аналіз динаміки розвитку.

**I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, L. B. Zimin, G. I. Sharaevsky**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants NAS of Ukraine, Lysogirska str., 12, building 106, Kyiv, 03028, Ukraine*

### UNKNOWN DIAGNOSTIC ASPECTS OF THE CHERNOBYL DISASTER, WHICH WAS CONSIDERED IMPOSSIBLE

The results of a comprehensive analysis of the true causes of the nuclear disaster at the Chernobyl nuclear power unit № 4 in 1986 are presented in this work. The systematization of chronology of occurrence and development of emergency is made. In the context of the analysis of the emergency reactor's dynamics, the complex of the defining physical, technical, diagnostic, and political factors that led to the fatal nature of the nuclear disaster is reviewed.

*Keywords:* Chernobyl disaster, analysis of the dynamics.

### REFERENCES

1. *Sharaevsky I. G.* Recognition of pre-emergency hydraulic processes in water-cooling nuclear power reactors: Avtoref. dis. ... d-ra tech. nauk. - Kiev: IPB AES NAS of Ukraine, 2010. - 48 p. (Ukr)
2. *On the causes and circumstances of the accident at Chernobyl Unit 4 April 26, 1986: Doklad komissii Gosudarstvennogo komiteta SSSR po nadzoru za bezopasnym vedeniem rabot v promyshlennosti i atomnoy energetike.* - Moskva, 1991. (Rus)
3. *INSAG-7. The Chernobyl accident. Supplement to INSAG-1: Doklad mezhdunarodnoj grupy po jadernoj bezopasnosti.* - Seria izdaniy po bezopasnosti, № 75-INSAG-7. – Vienna: MAGATE, 1992. (Rus)

4. *Mironov Yu. V., Nikitin Yu. M., Fomicheva T. I., Domoradov E. A.* Analysis of the RBMK-1000 dynamics at break pressure collector at low power // *Atomnaja Energiya*. - August 1993. - Т. 75, vol. 2. (Rus)
5. *The accident at Chernobyl and its consequences.* Infomatia, podgotovlennaya dlia soveshchaniya ekspertov MAGATE. - Vienna, 25 - 29 August 1986. - P. 1 & 2 / GKAE SSSR. - 1986. (Rus)
6. *INSAG-1.* The final report of the Review Meeting, the causes and consequences of the Chernobyl accident: Doklad mezhdunarodnoj grupy po jadernoj bezopasnosti. - Seria izdanij po bezopasnosti, № 75-INSAG-7. – Vienna: MAGATE, 1986. (Rus)
7. *Letter p/b A-1758 № 033-08/67* at 23.12.1983. (Rus)
8. *Letter p/b A-7291 № 050-01/1-120* at 02.02.1984. (Rus)
9. *Samoilov O. B., Usynin G. B., Bakhmet'ev A. M.* The safety of nuclear power plants: Uchebnoe posobie dlia vuzov // Pod red. L. S. Stermana. - Moskva: Energoatomizdat, 1989. - 280 p. (Rus)
10. *Dollezhal N. A., Emelianov I. Ya.* Duct nuclear power reactor. - Moskva: Atomizdat, 1980. - 208 p. (Rus)

Надійшла 01.12.2015

Received 01.12.2015