

Еще раз о характере взрыва 4-го блока ЧАЭС

© Н. В. Кравчук, 2010

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 14 апреля 2009 г.

Представлено членом редколлегии В. И. Старостенко

Будем называть истиной суждение, адекватное заданной сумме наблюдаемых фактов, где погрешность не превышает законного допуска

Л. Н. Гумилев

І донині немає розуміння всіх причин Чорнобильської катастрофи, тому з'являються все нові (часом досить екзотичні) версії. Запропоновано об'єднати ті з них, що ґрунтуються на реально спостережених і зафіксованих так чи інакше фактах та обставинах, з метою прояснити розвиток аварійного процесу хоча б в останні секунди його. Детально розглянуто послідовність вибухових процесів з підкресленням принципових відмінностей фізичної природи кожного з них, починаючи від першого, «парового», вибуху до «квазіядерного». Для виправдання теоретичних міркувань наведено конкретні приклади ситуацій, що були на інших об'єктах.

There is no understanding of all the reasons of the Chernobyl accident up to this day, that is why some fresh (sometimes exotic) versions appear. We propose here instead to unite those ones which are based on really observed and in some or other way recorded facts and circumstances aimed at clarifying the development of accident process at least during its last seconds. For this purpose we propose to consider in more details the succession of explosions processes with accents on principal differences of physical nature of each of them, beginning with the first one «steam» explosion up to «quasi-nuclear». In addition, to justify the given theoretical considerations exact examples of situations have been given we were met with before at the other objects.

Введение. Авария на ЧАЭС, произошедшая 26.04.1986 г., бесспорно, является крупнейшей из техногенных катастроф — по крайней мере, за последние 25 лет. По известности с ней могут сравниться разве что события 11.09.2001 г. в США, и вряд ли в настоящее время на Земле найдется человек, не слышавший об этих катастрофах. Вместе с тем никто не может представить полной и убедительной для всех картины этих событий, указав все причины, приведшие к ним. Относительно Чернобыльской аварии написаны тысячи работ, основные материалы и ссылки можно найти в публикациях [Информация ..., 1986; Васильев и др., 2006].

Часто вместо прояснения картины происходит скорее запутывание ее, порожденное множасимися (иногда взаимно противоречасими друг другу) «фактами» и разного рода мифами, уже давно сложившимися вокруг этого события. Не случайно в статье [Василь-

ев и др., 2006, с.20], опубликованной к 20-летию со дня Чернобыльской катастрофы, дана следующая констатация состояния дел по указанной проблематике: «К сожалению, ни один из документов [2, 3] (с описанием официальных версий событий — Н.К.) не содержит результатов исследования причин Чернобыльской аварии, что в какой-то мере свидетельствует о недооценке важности данного вопроса для дальнейшего безопасного использования ядерной энергетики».

О важности последнего свидетельствует многоплановая статья [Барьяхтар, 2006, с. 16], в которой рассмотрены соотношения между проблемами ядерной энергетики и сделан вывод о том, что «у ядерных технологий недостатки носят технический характер, у технологий сжигания — стратегический!» На сегодня в мире работает 436 атомных энергоблоков, которые производят около 18% всей электроэнергии (к тому же самой дешевой), и это их число

практически не изменилось за последние десятилетия вследствие аварии на ЧАЭС. Вместе с тем наметилась тенденция увеличения количества энергоблоков в разных странах. В Украине ныне работает 15 энергоблоков, вырабатывающих почти 50% всей электроэнергии, и планируется построить еще 10—12.

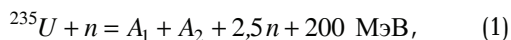
Поэтому так понятна важность следующего замечания авторов статьи [Васильев и др., 2006, с. 20]: «Если альтернативные версии причин (аварии на ЧАЭС — Н. К.) не рассматривать и не обсуждать, то не исключено, что будет потеряна возможность предотвращения аварий в будущем». Заметим, что в статье как раз и обсуждается несколько версий аварии на ЧАЭС в основном геофизического характера, в том числе экзотические. Но и таковые нельзя отбрасывать а priori ввиду крайней важности возможных последствий. Рассмотрим подробнее сугубо физические аспекты этой проблемы, необходимые для понимания характера аварии. Начнем с краткого обзора.

1. Принципы работы ядерных реакторов.

Для читателей, не являющихся специалистами в ядерной физике, стоит напомнить основные сведения из этой области.

Первое: некоторые тяжелые элементы, расположенные в конце периодической таблицы Д. И. Менделеева (далее — таблица), могут спонтанно распадаться на два и более осколков — осколков-ядер других элементов, что обусловлено поглощением свободного нейтрона ядром урана. Поэтому в большинстве энергетических ядерных реакторов (ЯР) в качестве топлива используют обычный уран ^{238}U (№92 в таблице), обогащенный делящимся его изотопом ^{235}U до 2—5% содержания¹.

Второе: при распаде урана оказывается, что суммарная масса продуктов распада меньше массы исходного ядра, так что в этом процессе происходит выделение энергии (которую и можно использовать с помощью устройства, называемого ЯР). Символически это можно записать так:



где n — нейтрон; A_1 и A_2 — ядра-осколки.

¹ Хотя известно 14 изотопов урана — от ^{227}U до ^{240}U , на практике используются только три из них — два упомянутых выше и делящийся изотоп ^{235}U ; в природной урановой руде содержатся изотопы: ^{238}U — в пропорции 99,28%; ^{235}U — 0,71%; ^{234}U — всего 0,0055%; остальные изотопы получают искусственно.

Согласно формуле (1), на выходе кроме ядер-осколков снова появляются два или три свободных нейтрона, каждый из которых способен вызвать распад других ядер (если попадет в них). Это явление было открыто почти 70 лет назад и названо *цепной реакцией* деления (в данном случае — урана). В результате цепной реакции из ^{235}U получается как его изотоп ^{239}U , так и ^{239}Pu (№94 в таблице) — единственный из изотопов плутония, который также может делиться, и другие элементы².

Третье: есть очень важный физический момент — при делении ядер большинство нейтронов вылетает из них сразу (так называемые *быстрые нейтроны*, имеющие энергию порядка 1 МэВ), но их меньшая доля (обозначаемая β) — *запаздывающие* нейтроны, вылетает из осколков ядра через ≈ 10 с с энергией около 0,1 эВ — так называемые *тепловые*, или *медленные, нейтроны*. В работающих ныне ЯР используются нейтроны второго типа, и, чтобы «включить в игру» часть быстрых нейтронов, применяют *замедлитель*, т. е. вещество, способное «притормозить» их, превращая в тепловые, которые затем более эффективно поглощаются другими ядрами ^{235}U , вызывая деление последних.

Отметим, что наиболее эффективный замедлитель — «тяжелая» вода D_2O , но можно использовать и простую («легкую») воду. Однако в случае ЯР типа РБМК (реактор большой мощности, кипящий) для этого применяется графит. Такие реакторы называются канальными ядерными энергетическими *уран-графитовыми*.

Активная зона в реакторах типа РБМК сконструирована так, что в ней происходит *самоподдерживающаяся* цепная реакция, т. е. при каждом распаде рождается хотя бы один нейтрон, вызывающий деление следующего ядра урана (иначе они могут улететь «вовне» или поглощаться ядрами других элементов). Более того, конструкция ЯР должна давать

² Речь идет о реакторах на *урановом* цикле, но существуют также ЯР на *ториевом* цикле, когда в реактор загружается изотоп ^{232}Th (обычно с добавлением изотопов ^{235}U или ^{239}Pu), в процессе эксплуатации перерабатываемый в изотоп ^{233}U , который полностью выгорает (работая на тепловых нейтронах). Поэтому на выходе практически нет радиоактивных изотопов. Перспективность таких ЯР еще и в том, что разведанных запасов тория на планете в 3 раза больше, чем запасов урана!

возможность установления в нем *динамического равновесия*, при котором число рожденных нейтронов в среднем равнялось бы числу поглощенных (и в таком случае говорят, что коэффициент k размножения нейтронов постоянен). Для этого над активной зоной помещается отражатель нейтронов, а сверху сооружается массивная защитная оболочка из железобетона. При динамическом равновесии реактор работает в *стационарном режиме*, по определению выделяя тепло, нагревающее теплоноситель — обычную воду, идущую на турбины генераторов тока в *одноконтурном* реакторе, каковым является РБМК-1000 [Кузьмина, Лобач, 1997].

Для контроля за работой ЯР вводится его характеристика — *реактивность* ρ , определенная, как $\delta k/k$, где $\delta k = k - 1$. Тогда *теоретически* при $\rho = 0$ ЯР работает в стационарном режиме, при $\rho < 0$ реакция затухает, при $\rho > 0$ нарастает, т.е. идет *разгон* реактора. Отечественные реакторы работают на медленных нейтронах³, доля β -нейтронов меньше доли быстрых во много раз. В случае РБМК-1000 $\beta \approx 0,45\%$. Таким образом, легко видеть, что такой реактор будет разгоняться лишь при $\rho > \beta > 0$, потому устойчиво управлять работой ЯР можно при $0 < \rho < \beta$. Отметим, что на практике *реактивность* понимается как степень отклонения ЯР от критического состояния, она может быть как отрицательной, так и положительной; *запас реактивности* — это максимально возможная реактивность, имеющая место при извлечении из реактора всех дополнительных поглотителей нейтронов; *оперативный запас реактивности* (ОЗР) — максимально возможная реактивность, которая

получается при извлечении из реактора всех стержней системы управления и защиты (СУЗ).

II. Конструктивные особенности РБМК-1000. Реактор типа РБМК-1000 был первым в СССР гражданским энергетическим реактором (его главный конструктор — Савелий Моисеевич Фейнберг, теплоэнергетик). *Первый блок* такого типа был введен в строй в *конце декабря 1973 г.* на Ленинградской АЭС (причем предполагалось отработанным паром обогревать и жилые дома!), а последний — в конце декабря 1985 г. на Курской АЭС.

Всего в стране было построено 14 таких реакторов, причем эксперт Госатомнадзора В.А. Жильцов заметил (после аварии на ЧАЭС), что «...каждый реактор работал и вел себя по-разному» (см. [Щербак, 1991])! На ЧАЭС все четыре блока были оснащены реакторами РБМК-1000 (электрическая мощность 1000 МВт).

Последний, **4-й блок, ЧАЭС** был сдан в эксплуатацию **31 декабря 1983 г.** Активная зона его реактора имела вид диска диаметром 11,8 м, толщиной 7 м и была образована 118 дискретными полиячейками, каждая из которых имела 16 каналов (4×4) с шагом 25 см. В каждой из полиячеек (кроме периферийных) было 14 каналов для топлива в виде тепловыделяющих сборок (ТВС). Еще один канал был предназначен для стержня СУЗ, а последний — либо для стержня системы аварийной защиты (АЗ), либо для датчика контроля энерговыделения по высоте активной зоны, которое пропорционально плотности потока нейтронов ([Карпан, 2006]). В периферийных полиячейках 15 каналов были топливными и только один оставлен для стержня СУЗ.

Топливом для реактора служит оксид урана UO_2 , заключенный в тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) в виде прочных циркониевых трубок (толщиной с карандаш), объединенных в упомянутые выше ТВС — 1159 шт., «с массой урана 0,1147 т каждая» (см. [Кариан, 2006]). Таким образом, в реакторе было 190,2 т UO_2 , т.е. в активной зоне содержалось не менее 80 критических масс, что составляло около 0,5% всей урановой загрузки.

По состоянию на 25.04.1986 г. в реакторе был один дополнительный поглотитель нейтронов и один незагруженный канал (столб воды), а также 179 стержней СУЗ. Стержни СУЗ состоят из двух частей: верхней — поглотителя на основе карбида бора длиной 5 м, и нижней — вытеснителя (на основе графита), поэтому при опускании сперва графито-

³ Выше шла речь о реакторах на медленных нейтронах с КПД порядка 33%, но есть проект ЯР на быстрых нейтронах, в которых ^{238}U превращается в ^{239}Pu , т.е. снова в ядерное топливо. В результате используется весь уран, так что ЯР — это своего рода «вечный двигатель» с КПД не менее 42%, который дает намного меньше отходов ядерного топлива (ОЯТ). Такой реактор может работать и на ^{232}Th . Однако перечисленные выше реакторы являются *надкритическими*, поскольку обычно содержат несколько десятков (а то и сотни) критических масс делящегося вещества, что делает их «тлеющими бомбами», по выражению И.В. Курчатова. Ныне разработаны (например, в России) проекты *поглотительных* реакторов, где поток нейтронов, запускающий цепную реакцию распада, исходит не спонтанно из внутренней активной зоны ЯР, а из специального ускорителя, приданного к ЯР, который и запускает (а также глушит) реактор.

вая часть вытесняет в канале столб воды высотой 1,2 м (отметим, что вода поглощает нейтроны в **21 раз** сильнее, чем графит!).

В реакторе было 170 т циркония, из которого изготавливались и трубы технологических каналов (ТК), по которым проходили под давлением вода (теплоноситель), пар и 1760 т графита (замедлителя нейтронов), так что **вся масса содержимого⁴** реактора (без воды) составляла **около 2120 т**. Вода шла потоком снизу вверх вдоль ТВЭЛов под давлением в 70 атм, охлаждая их и превращаясь при этом в пар (с температурой около 270—280 °С), который затем через барабаны-сепараторы попадал на турбины (ТГ), поскольку реактор РБМК — одноконтурный (в отличие от ЯР типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). В нем одновременно находится 30 т воды, которая превращается в пар со скоростью 1,5 т/с (при номинальной мощности), поэтому на выходе получается пароводяная смесь с 80% перегретого пара. Следовательно, корпус реактора должен выдерживать давление порядка 160—200 атм ([Карпан, 2006]), а крышка ЯР, через которую проходят стержни СУЗ и системы АЗ, должна быть особо защищенной, тем более что номинальная тепловая мощность РБМК-1000 — 3200 МВт. По свидетельству конструкторов, реактор мог выдержать максимум 4200—4500 МВт.

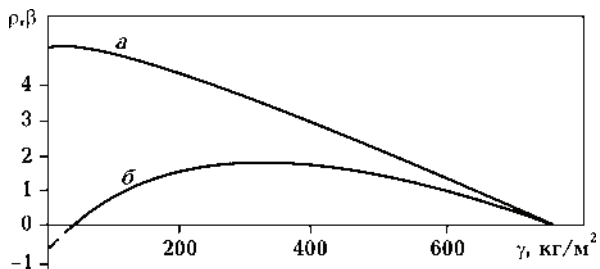
Отметим, что в отличие от 3-го блока (как и первых двух) на 4-м блоке стержни системы управления, вводимые снизу (УСП) **не были введены в систему АЗ**. Важность этих УСП заключается в том, что в процессе эксплуатации активная зона фактически разбивается по высоте на три подзоны, и наиболее опасной из них оказалась нижняя.

Недостатки ЯР типа РБМК. В монографии [Чернобыльская ..., 1993, с. 49] отмечается, что «на 4-м блоке ЧАЭС в 1983 году при физическом запуске стержни СУЗ внесли положительную реактивность в течение 5 сек — вместо отрицательной». Был известен и главный недостаток данного ЯР (согласно цитируемой монографии) — «большой паровой коэффициент реактивности», равно как и недостаточное быстрое действие стержней СУЗ. В частности, о

последнем недостатке в той же монографии указано весьма определенно (с. 64): «в реакторе РБМК время ввода всех стержней в активную зону было одинаковым и равнялось 18—21 сек», что и оказалось «...катастрофическим недостатком для компенсации положительных эффектов реактивности, особенно при малых уровнях мощности реактора». Обсуждены и недостатки самой конструкции стержней СУЗ, о которых шла речь выше: «...при некоторых состояниях активной зоны, даже при полностью погруженных стержнях, не предотвращалось образование локальных критических масс, так как высота критической зоны реактора РБМК составляет от 0,7 до 2 м» (там же). Все эти недостатки и проявились ночью 26 апреля 1986 г.

Стоит остановиться на *паровом эффекте*, который характеризуется паровым коэффициентом реактивности α (специфическим для данного ЯР). Паровой эффект возникает при закипании воды в технологических каналах, вследствие чего уменьшается коэффициент поглощения нейтронов и возрастает реактивность ЯР. При этом для РБМК эффект α становится положительным после выгрузки дополнительно поглотителя нейтронов из начальной загрузки активной зоны, и первоначально в проекте допускалось $\alpha = 4,5$ ($\beta_{эф}$ — паровой коэффициент реактивности), но в процессе эксплуатации обнаружилось, что для 4-го блока $0,38 \beta_{эф} \leq \alpha \leq 5, 2 \beta_{эф}$! Причем в работе [Щербак, 1991] утверждается, что это было определено из эксперимента, проведенного 24.04.86! (см. рисунок).

III. Свидетельства очевидцев аварии на 4-м блоке 26.04.1986 г. Примеры показаний разного рода свидетелей приведены в книге [Щербак, 1991], написанной по горячим следам (в буквальном смысле). Однако наиболее



Зависимость реактивности от плотности теплоносителя: кривая *а* построена на основе данных, полученных после события (взрыва); кривая *б* — рассчитана теоретически перед началом эксплуатации ЯР.

⁴ Отметим, что в реакторе 4-го блока на 25.04.86 г. оставалось около 75% первоначальной загрузки, остальное менялось в процессе эксплуатации посредством разгрузочно-загрузочной машины (РЗМ), размещенной над крышкой реактора.

информативны свидетельства очевидцев, которые находились в момент аварии в помещениях 4-го блока или рядом с ними. Эти люди имели практический опыт и обладали обостренным «чувством времени». Автор настоящей статьи должен признаться, что ознакомился с большинством свидетельств из публикации [Щербак, 1991; Карпан, 2006] уже после того, как имел свой устоявшийся теоретически взгляд на произошедшее, поэтому наиболее правдоподобными представляются те из них, которые так или иначе подтверждают нашу версию. (Впрочем, на свидетельства разного рода «рыбаков» и «грибников» вряд ли можно опираться.)

Одними из самых информативных, по моему мнению, являются показания Ю. Трегуба, начальника предыдущей смены 4-го блока: Л. Топтунов старший инженер управления реактором (СИУР) после падения мощности — при переходе с локального автоматического регулирования (ЛАР) на автоматическое (АР), «...стал стержни защиты вынимать, чтобы мощность удержать... Тянул почему-то больше с 3 и 4 квадрантов». После чего Ю. Трегуб указал ему: «Надо равномерно вынимать», и стал подсказывать, откуда можно вытаскивать стержни СУЗ, а Л. Топтунов либо слушал его «или делал по-своему!» После того, «как стали на автомат при мощности 200 МВт, я ушел от Топтунова».

Вскоре начался эксперимент, который проводился следующим образом: 26 апреля 1986 г. в 01 ч 23 мин 04 с «...была гана команда. Акимов (начальник смены блоков) ее дал. Киршенбаум, старший инженер управления турбиной (СИУТ), отключил стопорный клапан... Мы не знали, как работает оборудование от выбега, поэтому в первые секунды ... появилась какой-то нехороший звук. Я гумал, это звук тормозящейся турбины... как если бы «Волга» на полном ходу начала тормозить и юзом бы шла. Такой звук гу-гу-гу-гу... переходящий в грохот. Появилась вибрация здания». Впрочем, люди думали еще, что «это наверно ситуация выбега». Далее Ю. Трегуб продолжает: «Блочный щит управления (БЩУ) грожал, но не как при землетрясении. Если посчитать до 10 секунд — раздавался рокот, частота колебаний падала, а мощность их росла. Затем прозвучал удар... Удар этот был не очень — по сравнению с тем, что было потом, хотя сильный удар. Сотрясло БЩУ. И когда СИУТ (Киршенбаум) крикнул: «Гидроудар в деаэраторах!», я заметил, что зарабо-

тала сигнализация главных предохранительных клапанов (ГПК). Мелькнуло в уме: «8 клапанов... открытое состояние!».

Я отскочил, и в это время последовал второй удар. Вот это был очень сильный удар. Посыпалась штукатурка, все здание заходило... свет потух, потом восстановилось аварийное питание». А чуть ниже уточняет: «Открытие одного ГПК — это аварийная ситуация, а 8 ГПК — это уже было такое... что-то сверхъестественное» [Щербак, 1991, с. 41—42].

Нам представляются весьма существенными показания Н. Бондаренко, работавшего на азотно-кислородной станции «где-то в 200 метрах от 4-го блока. Мы почувствовали подземный толчок, типа небольшого землетрясения, а потом, секунды через 3—4, была вспышка над зданием 4-го блока. Я как раз посередине зала находился... повернулся, а тут как раз в окно вспышка такая — типа фотовспышки» (там же, с. 47).

О двух последовавших через несколько секунд взрывах говорили С. Газин (СИУТ из предыдущей смены) и Ю. Бадаев (работавший на вычислительном комплексе «Скала»): когда СИУР «...нажал кнопку полного погашения реактора, буквально через 15 секунд — резкий толчок и еще через несколько секунд — толчок более мощный. Гаснет свет, и отключается наша машина» (там же, с. 45).

Упомянутые обстоятельства выделял позже и эксперт следственной комиссии В. Жильцов (там же, с. 183), начальник лаборатории Всесоюзного научно-исследовательского института АЭС (ВНИИАЭС).

Приведем свидетельство одного из главных участников тех событий — заместителя главного инженера станции А. Дятлова, который по сути и командовал сменой. Это был знающий техник специалист (хотя человеческие качества, как отмечали многие, были «не на уровне»), и потому стоит отметить, как он представлял себе ситуацию на 4-м блоке сразу после взрыва: «...разорвались технологические каналы, в результате чего в реакторном пространстве поднялось давление и оторвало 2-тысячетонную конструкцию, пар устремился в зал и разрушил здание, верхняя конструкция после этого «села» на место. Что-то ее подбросило, и она стала на ребро — до этого я не додумался, да дела этого не меняло» (там же, с. 338). Оказывается, очень даже меняло, как увидим позднее!

Несмотря на такое правильное (в основном) понимание ситуации, о которой А. Дят-

лов сообщил директору ЧАЭС В. Брюханову, до вышестоящих руководителей эта информация почему-то не дошла (Н. Карпан, зам. начальника ядерно-физической лаборатории ЧАЭС), хотя на рассвете стало видно, что «взрыв полностью снес крышу, западную стенку центрального зала, развалил стену в районе машзала...». Но эта информация, по свидетельству Н. Карпана, «...вся оседала в бункере на уровне директора и главного инженера... и ее не пропускали дальше» ([Щербак, 1991, с. 79—81]).

Заметим, что уже тогда Н. Карпан был в двух-трех шагах от правильного ответа на случившееся: он считал, что после взрыва «...возможен выход блока из подкритического состояния в состояние, близкое к критическому. Критическое состояние — когда возможна самоподдерживаемая цепная реакция» [Щербак, 1991, с. 81]. А на вопрос — мог ли быть атомный взрыв, Н. Карпан ответил: «Нет. Если зона открыта, то взрыва уже не будет, потому что не будет давления» (там же). Странно, что в книге [Карпан, 2006] даже не упоминается об этом?

Потом было официальное заявление с версией произошедшего, и надо сказать — достаточно близкое к реальной картине (см. [Информация ..., 1986]), но явно **неполное**.

В 1988 г., исходя из результатов детального обследования состояния 4-го блока, без экивоков выразился И. Камбулов (начальник экспедиции Института атомной энергии им. И. В. Курчатова): «По-видимому, был локальный взрыв — может быть и не один, когда произошло расплавление, своего рода микрокотел» ([Щербак, 1991, с. 441]).

Приведем мнение Ю. Самойленко (позднее генерального директора ГПО «Спецатом» в г. Припять): «Если четко говорить, то реактор разгорелся почти через сутки после аварии — к 23 часам 26 апреля. И закончил он гореть к шести часам утра», т. е. горел 7 часов. Ю. Самойленко объясняет это так: «...аппарат обезвожен, происходит естественный разогрев топлива, потому что охлаждения нет плюс хороший доступ воздуха в результате разрушения какой-то зоны реактора. Загорелось топливо, поднялась температура. Где-то в пределах 1000 или более градусов началось интенсивное соединение графита и урана с образованием карбида урана. Вот он-то и горел. И когда оттуда все выдуло в виде радиоактивного облака, аппарат сам и загасился... Все улетело в атмосферу». Затем

продолжает: «А остальные выбросы, которые теперь мы называем «протуберанцами», были вызваны забрасыванием реактора мешками с песком и свинцом. Вот к чему привела засыпка реактора!» (там же, с. 249—250).

Таковы показания и размышления участников событий, сделанные ими по горячим (буквально) следам событий. Следовало бы добавить и показания ученых, отмечавших отсутствие ядерных реакций в реакторе уже с конца первой декады мая (там же), но об этом позже.

IV. Теоретические попытки описания аварийного процесса на 4-м блоке

Несмотря на достаточно полные показания очевидцев, общепризнанной единой хронологии событий нет (см. [Чернобыльская ..., 1993]), что осложняет анализ причин и обстоятельств взрыва. Однако приборами зарегистрирована последовательность событий в течение около 10 с, непосредственно предшествовавших взрыву, на которую вполне можно опираться.

Этим и воспользовался член-корр. РАН Г. Н. Кружилин в статье [Кружилин, 1997, с. 331], начинающейся словами: «Катастрофа на ЧАЭС породила, естественно, проблему ее возможно более полного понимания». Автор основывался на официально принятой хронологии развития событий на 4-м блоке ЧАЭС ночью 26.04.1986 г., точнее, на последнем этапе ее, занявшем 10 с — от момента начала разгона реактора. При этом за первые 3 с мощность выросла от 200 до 530 МВт, т. е. в 2,65 раза, за последующие 3 с — до 1600 МВт, как отмечено приборами, т. е. в 3,03 раза, из чего Г. Н. Кружилин заключил, что «мощность менялась во времени по закону

$$W = W_0 \exp(t/3) = 200 \exp(t/3). \quad (2)$$

Это означало, что разгон мощности в эти первые 6 с происходил при неизменном избытке реактивности. Еще через 4 с произошел разрыв рабочих каналов реактора с выбросом пара из них, на что указывал сигнал резкого повышения давления газа в графитовой кладке реактора» (там же, с. 331). Из этого Г. Н. Кружилин сделал вывод, что разгон реактора за 10 с «происходил с участием запаздывающих нейтронов, поскольку на мгновенных он происходил бы в 100 раз быстрее» (там же). Далее он показывает некорректность применения другими авторами иной формулы, отличной от (2).

Г. Н. Кружилин объяснил, почему не сработала система аварийной защиты АЗ-5: «До испытаний реактор работал на мощности 1600 МВт, и на этом уровне мощности были установлены сигналы АЗ. При проведении испытаний эти сигналы не были перенесены на уровень 200 МВт и продолжали оставаться при 1600 МВт». После анализа разгона реактора Г. Н. Кружилин отметил: «Нажатие же по команде на кнопку АЗ-5 через 3 с после начала разгона из-за затраты времени на ее восприятие в действительности практически совпало со срабатыванием сигналов АЗ при мощности 1600 МВт, т. е. через 6 с от начала разгона. Так что фактически нажатие на кнопку АЗ-5, по-видимому, вообще не оказало влияния на процесс разгона» (там же, с. 332). Согласно Г. К. Кружилину, если бы аварийная защита была выставлена правильно, то аварии не было бы.

Однако позже группа теоретиков во главе с А. А. Рухадзе (частное сообщение) проверила, согласуются ли выводы предыдущего автора с физикой процессов, происходящих в ЯР. При исследовании дифференциальных уравнений кинетики реактора, в приближении одной эффективной группы запаздывающих нейтронов (с временем жизни $\lambda = 0,1 \text{ с}^{-1}$), получено следующее уравнение для изменения плотности потока нейтронов:

$$\frac{d^2 n}{dt^2} = \frac{(\rho - \beta - \lambda T)}{T} \frac{dn}{dt} + \lambda \frac{\rho}{T} n, \quad (3)$$

где $T = 10^{-3} \text{ с}$ — время жизни одного поколения мгновенных нейтронов, которое в приближении $\lambda T \ll \beta$ совпадает с исходным.

Сперва авторы рассмотрели аргумент официальной комиссии 1986 г., согласно которому авария произошла по причине перегрева теплоносителя из-за локального увеличения мощности, а перегрев же вызвал уменьшение плотности теплоносителя, что и привело к росту реактивности $\rho(t)$.

«Электротехническое испытание», проводимое на 4-м блоке ночью 26.04.86 г., заключалось в использовании энергии выбега (по инерции) турбогенератора ТГ-8 для «гарантированного поддержания принудительной циркуляции теплоносителя в контуре охлаждения реактора», для чего требовалось обеспечить электропитание четырех главных циркуляционных насосов (ГЦН), по два с каждой стороны реактора (всего на блоке восемь насосов), за счет электроэнергии, полученной

от турбогенератора, вращающегося по инерции некоторое время.

Таким образом, надо было отключить турбину от поступления на нее пара и определить время, необходимое для указанной выше цели, — должно было быть примерно 40 с. За это же время следовало включить резервные дизель-генераторы, которые должны питать блок.

Во время испытаний другие четыре ГЦН получали питание от 3-го блока, и в любом случае должны были обеспечить нормальное охлаждение реактора, хотя бы до мощности 1600 МВт (т. е. 50% номинальной). Однако разгон реактора в реальности начался с 200 МВт, т. е. от 6% номинальной мощности!

Еще раньше, 25.04.86 г. в 8.08, была заблокирована АЗ-2 и выбиты защитные уставки ТГ-8, затем в тот же день, в 14.00, была отключена система аварийного охлаждения реактора и т. д.

Тогда коэффициент $\alpha = d\rho/d\gamma$, где γ — плотность теплоносителя (или его паросодежание); изменение реактивности $\rho(t)$ описывается (локально) уравнением

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{d\rho}{d\gamma} \frac{d\gamma}{dt}. \quad (4)$$

В предельном случае (в данной аварии) для реактивности ρ имеем несколько иное уравнение для эволюции ρ , а именно

$$\frac{d\rho}{dt} = \alpha\beta \frac{n}{n_0}, \quad (5)$$

где $\beta = 0,0045$; $\alpha < 0,025 \text{ с}^{-1}$; n — плотность потока нейтронов; n_0 — начальная плотность; β — паровой коэффициент реактивности.

Тогда решения этих уравнений (для данной ситуации) принимают вид

$$\rho(t) = \beta \left[\alpha t + \frac{1}{2} \alpha^2 t^2 + \left(\frac{1}{2} \alpha^3 + \frac{\lambda}{6} \alpha^2 \right) t^3 + o((\alpha t)^3) \right], \quad (6)$$

$$n(t) = n_0 \left[1 + \alpha t + \left(\frac{3}{2} \alpha^2 + \frac{\lambda}{2} \alpha \right) t^2 + o((\alpha t)^2) \right]. \quad (7)$$

Используя эти решения, авторы показали, что даже если принять вариант a (см. рисунок, кривая a) за основу (хотя он был выбран ad hoc — после аварии!), при всех за-

данных начальных условиях рост мощности за первые 10с не мог превышать более чем в 1,5раза исходную, так что достигнуть уровня в 530МВт реактор мог не ранее, чем через 20с (т.е. рост был бы медленнее — почти на порядок)!

Мы полагали, что хорошо было бы иметь подтверждение вывода А. Рухадзе с сотрудниками на практике, для чего, как оказалось, можно использовать обстоятельство, которое имело место также на ЧАЭС, но уже на 1-м блоке, 09.09.1982г., — и тоже аварию! Тогда в реакторе, работавшем на мощности 700МВт, из-за ошибки ремонтников, закрывших запорно-регулирующий клапан на технологическом канале ТК-62-44, не было циркуляции теплоносителя. Поэтому «за 35—40 секунд ТВЭЛы в нем разогрелись до температуры 800°C», в результате «ТВС приобрела бочкообразную форму, и ее ТВЭЛы стали касаться стенок ТК». Эти стенки тоже вскоре разогрелись до 650°C, а затем при внутреннем давлении пароводяной смеси (порядка 70атм) «произошел разрыв ТК, и началось истечение теплоносителя в графит» и т.д. (подробно этот случай описан в [Карпан, 2006, с. 297—299]. Но и после этого персонал блока более 20мин удерживал реактор на мощности 700МВт!

Этот случай подтверждает правильность вывода А. Рухадзе, что время развития (локальной) неустойчивости намного превышает результаты того численного моделирования, которые привел Г.Н. Кружилин в своей статье. Таким образом, расчеты последнего отражают физически иную ситуацию в реакторе, т.е. потоки нейтронов возрастали намного быстрее, чем это должно было быть при предполагаемом изотопном составе топлива в реакторе.

Поэтому А. Рухадзе с сотрудниками стали искать механизмы (весьма экзотические), которые привели бы к обогащению топлива изотопом ^{235}U , что объяснило бы, с одной стороны, результаты Г.Н. Кружилина, а с другой — результаты измерений изотопного состава остатков топлива, проведенных акад. НАН Украины Э.В. Собоновичем с сотрудниками [Собонович и др., 1990].

Согласно упомянутым исследованиям (там же, с. 888), «...повсеместно отмечалось избыточное содержание изотопов урана ^{235}U и ^{234}U ... В почвах ближней зоны ЧАЭС присутствует специфическая форма техногенного урана, характеризующаяся высокой степенью обогащения изотопом ^{235}U » (здесь и ниже выделена нами) — Н.К.).

Затем [Собонович, 1990, с. 888] авторы делают осторожное замечание: «Что же касается непосредственного источника поступления в окружающую среду этой мелкодисперсной формы урана, то он, к сожалению, пока не установлен... **Присутствие на РБМК-1000 ядерного топлива такой степени обогащения труднообъяснимо.** Тем не менее эта гипотеза среди всех прочих представляется нам наиболее приемлемой».

Упомянутые странности наблюдались не только **вне блока**. В работе [Кузьмина, Лобач, 1997, с. 39] читаем: «К моменту аварии активная зона реактора содержала 1659ТВС с массой урана 0,1147т каждая, в общем 190,2т. Большая часть загрузки имела выгорание от 11 до 15МВт сут/кг, в активной зоне было также некоторое количество свежего топлива».

В результате исследований остатков топлива, проведенных авторами во **внутренних** помещениях 4-го блока, выявлено превышение отношения плутония к урану в 5 раз(!), как если бы это было «для случая среднего топлива» (там же, с. 42). И далее: «такое несоответствие велико, и не может быть объяснено методическими погрешностями. Также маловероятно, что отношение Pu/U вследствие каких-либо геохимических факторов становится больше, чем в исходном топливе» (с. 42—43)⁵.

V. Выводы из предыдущих исследований.

Рассмотрим более подробно характер (многоступенчатого) взрывного процесса в реакторе.

1. При условиях, исследованных Г.Н. Кружилиным, к 10-й секунде первым результатом был «паровой взрыв реактора» ([Кружилин, 1997]; дальнейшее см. выше), что соответствует и воспоминаниям очевидцев — первый «длинный» (двойной?) взрыв, после которого в помещениях как 4-го, так и смежного 3-го блока сразу появились масса пыли и пар (по [Щербак, 1991]). Но ведь не надо забывать, что паровой взрыв — это **объемный** взрыв, который вполне мог приподнять (тысячетонную!) крышку реактора, и пар тут же вышел в образовавшуюся щель. Плита села на место, снова поднялось давление (пока была вода!) и снова пар мог «пыхнуть», как

⁵ Таким образом, авторы статьи [Кузьмина, Лобач, 1997] как бы подводят нас к мысли, что все это **уже было** в реакторе апрельской ночью 1986г.

через крышку в кастрюле, только масса крышки — 1000 т, потому возникли сильные сотрясения! Однако при этом заметная часть содержимого реактора (напомним — массой в 2120 т!) вылететь не могла, как не вылетает вода и другое содержимое из кастрюли при кипении!

2. Если принять затем гипотезу об «образовании водорода в реакторном пространстве» и его последующем взрыве (хотя понятного описания механизма этого явления мы не нашли), то снова оказываемся в ситуации **объемного** взрыва. Возникает вопрос: как могло накапливаться так много газа, если учесть, что температура внутри реактора была уже порядка тысячи градусов! Напомним, что главное известное свойство такого взрыва — резкое (**взрывное**) **уплотнение** содержимого **замкнутого** объема, в котором происходит взрыв, пока данный объем не «раскрылся», но без выброса наружу тяжелых фрагментов той массы, которая была в реакторе!

3. При рассматриваемом взрывном уплотнении скорее может образоваться критическая масса, причем именно в нижней части 3-го квадранта (юго-восточного) реактора. Действительно, Н. Карпан приводит следующее наблюдение: «...*мощность реактора в этой области увеличивалась в «е» раз за 0,33 секунды, а за одну секунду — более чем в 20 раз*», но эта секунда как раз и была 9-й или 10-й секундой взрывного процесса. Так что в 4-м блоке был *квазизерный* взрыв, поскольку известно, что «настоящий» ядерный взрыв с полным для такой ситуации выделением энергии (и, соответственно, максимальными нейтронными потоками) не мог произойти, ибо пространство реактора уже было раскрыто. Такого типа взрывы случались и у нас, и за рубежом, по рассказам экспериментаторов (так и очевидцев), при случайных образованиях критической массы делящихся веществ (в частности, на радиохимических комбинатах).

4. Сделанный вывод объясняет и все наблюдавшиеся факты (см. выше), и последствия событий 26.04.1986 г. Рассмотрим это подробнее. Поскольку эпицентр взрыва находился на высоте 0,5—0,7 м от днища реактора, то образовавшееся плазменное облако практически мгновенно повысило температуру *ближнего окружения* до нескольких тысяч градусов, и успело расплавиться (или испариться?) не только оно, но и часть днища реактора, через которую в подреакторные помеще-

ния проникла (вследствие «отдачи») известная лавообразная топливосодержащая масса (ЛТСМ). Большинство содержимого реактора, которое находилось выше уровня эпицентра взрыва, перевернуло не только крышку реактора (ту самую, ставшую знаменитой «Елену»), но и всю верхнюю часть блока (масса свыше 2000 т), часть содержимого отразилась от «Елены» и упала назад, а часть вылетела наружу. Причем более тяжелые фрагменты разбросало в ближайших окрестностях блока, а часть в виде плазмы улетела вверх (сопровождалось «фотовспышкой», которую отметили свидетели), образовав радиоактивное облако, «путешествовавшее» в атмосфере вокруг Земли, и оставляя радиоактивные следы на поверхности планеты.

5. При последнем взрыве образовались мощные потоки заряженных ионов, породившие соответствующие всплески тока в ближних электросетях, разрушив электрооборудование блока и выбив предохранители — почему там все «погасло» (см. [Карпан, 2006, с. 365—369]). Можно полагать, что имело место явление, возникающее при ядерных взрывах и называемое электромагнитным импульсом, хотя в весьма *ограниченном*, почти замкнутом объеме.

6. Что касается *сейсмического* воздействия, то взрыв такой силы, таких масштабов, сотрясший здание блока массой в десятки тысяч тонн, безусловно, мог *индуцировать* локальное землетрясение, особенно если учесть расположение ЧАЭС на пересечении зон глубинных разломов [Васильев и др., 2006; Аптикаев и др., 2000]. Это и породило (временную) сейсмическую неустойчивость соответствующего региона вдоль них, что было выявлено впоследствии проведенными систематическими наблюдениями.

Более того, наблюдения, приведенные в работе [Аптикаев и др., 2000], позволяют, по нашему убеждению, уточнить хронологию рассматриваемых событий на 4-м блоке ЧАЭС, способствуя более глубокому пониманию их предыстории.

Но обратное влияние, точнее, возможность инициирования неким локальным землетрясением аварии на реакторе — весьма маловероятна, если учесть жесткость конструкции, специально обрисованной нами достаточно подробно в начале статьи.

7. Коснемся *принципиальной возможности* характеристики взрыва на 4-м блоке именно как *квазизерного*. Для этого кроме упомяну-

тых выше аварийных случаев вспомним об «эксперименте», который был проведен за 8 месяцев до аварии на ЧАЭС на Дальнем Востоке.

10 августа 1985 г. при замене активной зоны кормового реактора атомной подводной лодки (АПЛ) К-431 Тихоокеанского флота (на базе ВМФ «Шкотово-22» в бухте Чажма) произошел взрыв, вполне аналогичный исследуемому нами, — только масштабы катастрофы были значительно меньшими, поскольку реактор на подлодке выглядел малюткой по сравнению с РБМК.

Там также была выдернута вверх крышка реактора (с которой сочленены стержни СУЗ), но *чисто механическим* воздействием — плавающий кран, который должен был приподнять ее чуть-чуть, качнуло волной. В результате реактор тут же самозапустился. Далее опишем все по БК-93 (цит. по [Карпан, 2006]): «Реакция шла 0,7 секунды. Мощность излучения была выше 50 тысяч рентген» (! — Н. К.), так что «выделилось огромное количество энергии, произошел выброс всего, что было в реакторе, над ним и рядом с ним... (! — Н. К.). Крышка реактора весом в 12 тонн вылетела (по свидетельствам очевидцев) на высоту полтора-два метра и снова рухнула вниз на реактор». Самая высокая концентрация загрязнения была отмечена в эпицентре взрыва и ближних окрестностях.

8. Удивляет, почему этого обстоятельства не заметили специалисты, которые занимались ликвидацией аварии на ЧАЭС, — ведь описанный характер взрывов на АПЛ «Шкотово-22» объясняет, почему больше не было взрывов на 4-м блоке, — основная масса *локального* состава топлива, который мог уплотниться к критической массе, уже прореагировала во время последнего из взрывов («выгорело» то, что могло взорваться), поэтому последующая ситуация на блоке была в данной смысле безопасной.

9. Ухудшали ситуацию на ЧАЭС после аварии такие действия «спасателей», как забрасывание вылетевших остатков топлива обратно в реактор, мешков со свинцом, песком, глиной, известняком и т. п., коих к 6 мая в «кратере» уже было «более 4 тысяч тонн» ([Щербак, 1991, с. 171]).

Приведенное выше утверждение Ю. Самойленко совершенно верно!

Физики к тому времени знали, что «...цепной реакции там нет, реактор заглушен» (там же, с. 189), да и академик В. Легасов подтверждал, что к 10 мая «мы убедились, что реактор не работает, новой наработки быстро распадающихся изотопов нет... Но горит графит и выделяется тепло» (там же, с. 415).

10. Эти утверждения подкрепляются приведенными наблюдениями того, сколько было выброшено доз радиации: за сутки «26 апреля — 25 %, с 27 апреля по 6 мая интенсивность выбросов снизилась в 6 раз, но с 3 мая интенсивность выбросов неожиданно (! — Н. К.) вновь возросла и достигла ≈70 % первоначального выброса. На 10-е сутки — резкий спад активности до 1 % первоначального уровня. Общая радиоактивность выбросов, не считая полной утечки благородных газов (ксенона и криптона), по мнению экспертов, составила от 300 до 500 миллионов кюри» ([Щербак, 1991, с. 154]).

11. Можно дать прогноз, подсказанный замечанием акад. НАН Украины Э. В. Собоновича (в ноябре 2008 г.), когда автор статьи изложил ему приведенные соображения о ходе аварийного процесса. Э. В. Собонович заметил: «Если это верно, то получается, что ни к чему было также строить подземные фундаменты, да и саркофаг тоже? Следовало все залить бетоном и баста!».

Итак, все последующие «стенания» о новом саркофаге, об опасности новой аварии на развалинах 4-го блока выглядят необоснованными. Нужно только беспокоиться о неразнесении ветром, дождем и подземными водами радиоактивных остатков аварии.

Автор признателен академику НАН Украины В. И. Старостенко, поставившему рассматриваемую задачу, и академику НАН Украины Э. В. Собоновичу, дискуссии с которым помогли автору в написании статьи. Также автор выражает благодарность всем участникам научного семинара Института геофизики НАН Украины за полезные обсуждения и замечания.

Список литературы

Аптикаев Ф. Ф., Барковский Е. В., Кегров О. К., Копничев Ю. Ф., Омельченко В. Д., Страхов В. Н. О сейсмическом событии 26 апреля 1986 года в

районе Чернобыльской АЭС // Физика Земли. — 2000. — № 3 — С. 75—80.

Барьяхтар В. Г. Двадцать первый век: производство

- энергии, уровень жизни, экология, проблемы // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 7—18.
- Васильев В. Г., Кендзера А. В., Омельченко В. Д., Старостенко В. И., Страхов В. Н., Яницкий И. Н.* Чернобыльская катастрофа. Геофизические аспекты // Геофиз. журн. — 2006. — **28**, № 3. — С. 19—33.
- Информация об аварии на Чернобыльской АЭС и ее последствиях, подготовленная для МАГАТЭ* // Атом. энергия. — 1986. — **61**, вып. 5. — С. 301—320.
- Карпан Н. В.* Чернобыль. Месть мирного атома. — Киев: ИКК «Баланс-клуб», 2006. — 560 с.
- Кружилин Г. Н.* О характере взрыва реактора РТМК-1000 на ЧАЭС // Докл. РАН. — 1997. — **354**, № 3. — С. 331—332.
- Кузьмина И. Е., Лобач Ю. Н.* Ядерное топливо и особенности формирования аэрозолей в объекте «Укрытие» // Атом. энергия. — 1997. — **82**, вып. 1. — С. 39—44.
- Соботович Э. В., Чебаненко С. И.* Изотопный состав урана в почвах ближней зоны ЧАЭС // Докл. АН СССР. — 1990. — **315**, № 4. — С. 885—888.
- Чернобыльская катастрофа: причины и последствия.* Ч. 1. — Минск: ТЕСТ, 1993. — 214 с.
- Щербак Ю. Н.* Чернобыль: Документальное повествование. — Москва: Сов. писатель, 1991. — 462 с.