

ACCIDENT ON CRITICAL ASSEMBLY STAND AT RFNC - VNIIEF

V. T. Punin, I. G. Smirnov and S. A. Zykov, RFNC - VNIIEF

Atomnaya energiya, Vol 83, No 2, August 1997

An accident occurred on critical assembly stand FKBN-2M at 10:50 AM on 17 June 1997.

In this paper, we do not presume to discuss the subjective causes of the accident, the nature of violations made in organizing the work (and such violations did occur) or the actions of those directly involved in the incident. Our task will be to reproduce events from the technical standpoint, to explain the nature of the experiment carried out on the facility, and also to clarify certain technical problems that were solved in the course of cleaning up the aftermath of the accident.

Critical assembly stand FKBN-2M is designed for studying structures that contain fissile materials in a configuration and quantity sufficient for realization of a nuclear fission chain reaction. Such experiments are necessary for checking the correctness of calculations of power and research reactors, fast reactors (including pulsed reactors) and nuclear weapon components.

In general, an experiment on such a facility is carried out as follows. First, a clearly subcritical section of the structure to be studied is assembled on the lower movable part of the stand, the lower platform being moved to the extreme upper position. The subcriticality of this section is assured by careful preliminary computations (with a considerable safety factor) and by the experience of previous work. Special measures are also taken to protect against possible errors in assembling this part of the structure. These measures include the presence of an inspector during assembly, and also continual observation of the neutron flux from the source put into the center of the assembly. Long before criticality is attained, the assembly begins to "feel" it coming on; it acquires the property of intensifying the neutron flux from the internal source. This flux is continually measured and displayed at the work site, and, in addition, it is relayed through a speaker system as a series of loud clicks (see diagram).

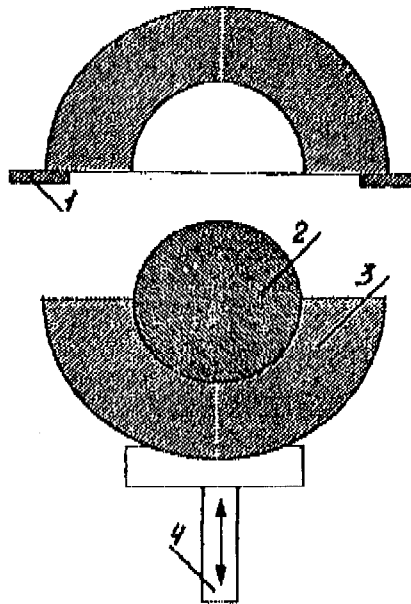


Diagram of stand: 1—stationary part of stand with upper fragment of assembly; 2—fissile material; 3—reflector; 4—movable part of stand

The assembly procedure itself is a sequence of putting hemispherical layers of different materials one into another, like Russian dolls. To have the capability of simulating a variety of configurations, the experimenter is provided with a set of hemispheres of different materials (uranium, steel, copper, and so on) in standardized sizes.

Following assembly of the lower part of the structure, it is put into the extreme lower position, and the rest of the system that is required for bringing it to the critical state is assembled on the upper stationary part of the stand. After this, the experimenter leaves the room, and further manipulation with the assembly (bringing the upper and lower parts together, diagnostic measurements, and so on) is done remotely from a console that is separated from the room by several meters of concrete shielding.

After the assembly has been put into the critical state, it is essentially a very low-power fast reactor. Such a system has the property of self-regulation: if reactor power increases, this results in heating of the material, thermal expansion, and consequently a reduction of criticality, i.e. a drop in power. Thus, if the criticality of the assembly is sharply increased, there is a burst of neutron radiation, then it drops sharply to below the initial level, and after that again begins to rise and after a few oscillations settles down to a constant emission power. When designing buildings for conducting operations of this kind, meters of shielding are provided against a worst-case scenario. Such a scenario is the abrupt movement of the assembly past criticality when rapid heating may result in melting of assembly materials. In such an event, meltdown of the core automatically interrupts the chain reaction, but the inside of the room is contaminated. Attainment of the melting point is accompanied by intense neutron radiation, and it is for shielding from this radiation that the walls of the room are designed in accordance with stringent standards of radiation protection.

Just what did happen on stand FKBN-2N on 17 June 1997? The experimenter was doing a control assembly of a previously thoroughly studied system incorporating high-enriched uranium and a copper reflector. Being an experienced operator who had previously done several hundred critical experiments, he was quite sure that in this case he was working with a well-known system and was not anticipating any surprises. After starting the experiment, at a certain stage he apparently began to have doubts, and he disassembled part of the structure and began assembly once more without putting a control ("seed") source of neutrons inside. The shielding system in this case did not lose operability, as the source was near the assembly; however, sensitivity dropped appreciably. It should also be noted that, among previously studied systems, there are several similar critical assemblies that are equivalent in their final state, but their criticality is reached by different means; hypothetically speaking, one assembly contains "a lot of uranium and not much copper," while another contains "a little uranium and a lot of copper." We remind you that all hemispheres used in the experiments have standardized dimensions, i.e. the descriptions of assemblies use the same numerical values of the radii of their component parts. In a system with a large amount of copper, less uranium should accordingly have been put into the assembly; however, the one that was finally assembled turned out to be a structure in which there was "a lot of uranium and a lot of copper."

At the instant when the experimenter was putting in the copper hemisphere, the system was already near critical. If there had been a "seed" source inside the assembly, then undoubtedly, information about the nearness of the system to the critical state would have shown up in time, but the source was on the outside. At this instant, the hemisphere slipped out of his rubber-gloved hands and fell onto the uranium sphere previously assembled on the lower part of the stand in the copper reflector half. At this point, the lower part of the assembly, overloaded with uranium, went prompt critical. This was accompanied by a bright flash and a heat wave and triggered operation of the emergency drop of the lower part of the assembly (this measure is provided for use during the remote operation of the assembly platform from the console room). When he was aware that a nuclear accident had occurred, the experimenter quickly left the room and closed the shielded doors, thereby isolating the room from those adjacent to it. He notified his superiors about the incident and was immediately hospitalized.

Specialists arriving at the scene were faced primarily with the task of determining the final state of the assembly and the likely side effects of the accident in addition to the initial intense neutron burst that had been the direct cause of overexposure of the experimenter.

At approximately 1:00 PM, it had been firmly established first of all that there were no aerosolic or dust contaminants in the room, and secondly that the assembly was in a radiating state, i.e. in the critical mode. Standard operating procedure involves continual monitoring of the neutron flux in the room by a multiband system of neutron sensors. After the accident, readings were off the scale on all bands except the last. By using the channel that remained operable, it was possible, within certain limits, to monitor the relative change in neutron flux from the assembly. The absence of aerosolic contaminants was an indication that the core had not been destroyed in the accident, and stability of the neutron flux was evidence of attainment of an equilibrium (self-regulating) of the chain reaction in the system that had been formed on the stand.

Visual inspection of the room was possible through a periscope, and in addition some photographs could be taken through the opening of the door of the room. The system that had been formed was a uranium sphere in a copper shell 8 mm thick put into a hemispherical copper reflector about 260 mm in outside diameter. The entire system was in the lower part of the stand, and it was not possible to change its configuration by the standard means of controlling the assembly.

From the technical standpoint, the problem was to find some way of remotely removing part of the material of the assembly, or of changing its configuration to one that was less "dense." The only thing available to the specialists for doing this was a traveling crane that was remotely controlled from the console room. Nor was attaching any tools to the hook of this crane a trivial task, as access of personnel to the room was ruled out due to heavy dose loads. In accordance with the physical particulars of critical systems, bringing any material near the wrecked assembly immediately increased its reactivity, i.e. it raised the neutron flux and total release of energy. Thus, proposed methods of emergency disassembly had to take into account that any mass brought near the system in the process of bringing it out of the critical state had to be minimized.

The technical committee worked out and discussed several dozens of options for solving the problem. These options included various methods of remote action on the assembly (mechanical, chemical, the use of precision explosive technology, gas and plasma cutting, and so on). The most promising of these were chosen, and they were immediately developed under laboratory conditions and in the adjoining experimental room which had an analogous configuration. Specially fabricated mockups of the critical assembly were used in this work. In parallel with this, extensive work was being done in theoretical departments on calculations simulating the influence of various actions on the criticality of the system. Neutron and thermal characteristics were also predicted for the various solution scenarios.

The first action taken to resolve the emergency situation was to evacuate from the room the containers of the remaining nuclear materials that had not been used in the assembly. This operation was done by a robot developed at N. E. Bauman Higher Technical Academy in Moscow and delivered to VNIIEF by a subdivision of the RF Ministry of Emergency Situations. After the room had been completely cleared of these materials, specialists proceeded to the main part of the work: to remotely change the configuration of the damaged assembly.

Results were achieved by using the first method that was tried and that had been the most thoroughly worked out by the time the operation began. Using the same robot, a thin-walled tapered vacuum suction device was hung on a hose from the hook of the traveling crane. By moving the crane, the suction device was put onto the upper part of the copper hemisphere covering the uranium ball. The concomitant perturbation of reactivity roughly quadrupled the neutron flux and thermal power of the reaction. After turning on the vacuum pump and starting to lift, the assembly was split along one of the hemispheric contact surfaces, immediately stopping the chain reaction. After the neutron flux had dropped to the background level, the assembly was moved by the crane to a reserve metal support and left in that position for subsequent final disassembly. Thus, the operation of resolving the emergency situation on the FKBN-2M stand was completed at about 1:20 AM on 24 June 1997.

Of course, our description has left out many technical details, in particular, the organization of a system of television surveillance of the room, details of the operation to remove the containers, the procedure of hanging tools on the crane hook, and so on. From the results of the work, detailed technical reports have been prepared with a description of all details of the operation; [such reports have] also been prepared on the alternative approaches to putting an end to the accident, which were experimentally worked out to a significant extent in the course of getting ready for the main operation.

АВАРИЯ НА СТЕНДЕ КРИТИЧЕСКИХ СБОРОК В РФЯЦ — ВНИИЭФ

17 июня 1997 г. в 10 ч 50 мин утра на стенде критическихборок ФКБН-2М произошла авария.

В настоящей статье мы не предполагаем обсуждать субъективные причины аварии, характер допущенных нарушений при организации работ (а такие нарушения имели место), а также действия лиц, непосредственно причастных к инциденту. Нашей задачей является воспроизведение событий с технической точки зрения, объяснение характера эксперимента, проводившегося на установке, а также разъяснение некоторых технических проблем, решавшихся в ходе ликвидации последствий аварии.

Стенд критическихборок ФКБН-2М предназначен для исследования конструкций, содержащих делющиеся материалы, в конфигурации и количестве, достаточном для осуществления цепной реакции деления ядер. Такие эксперименты необходимы для проверки правильности расчетов энергетических и исследовательских ядерных реакторов, быстрых реакторов (в том числе импульсных), элементов ядерного оружия.

В общем виде эксперименты на такой установке осуществляются следующим образом. Сначала на нижней подвижной части стенда собирается заведомо подкритичная часть исследуемой конструкции, при этом нижняя платформа перемещена в крайнее верхнее положение. Подкритичность этой части обеспечивается предварительными тщательными расчетами (со значительным запасом) и опытом предыдущих работ. Принимаются также специальные меры защиты от возможных ошибок при сборке этой части конструкции. Эти меры включают присутствие контролера при сборке, а также постоянное наблюдение за нейтронным потоком от источника, помещенного в центр сборки. Задолго до достижения критического состояния сборка начинает «чувствовать» приближение к нему, приобретая свойство усиления нейтронного потока от внутреннего источника. Этот поток постоянно измеряется, отображается на рабочем месте, и кроме того, транслируется через громкоговоритель в виде последовательности громких щелчков (см. рисунок).

Сама процедура сборки представляет собой последовательное вложение один в другой полусферических слоев различных материалов, как в кукле-матрешке. Для того чтобы иметь возможность моделирования разнообразных конструкций, в распоряжении экспериментатора есть набор полусфер из различных материалов (урана, стали, меди и др.) стандартизованных размеров.

После того как нижняя часть конструкции собрана, она отводится в крайнее нижнее положение, и на верхней неподвижной части стенда собирается оставшаяся часть системы, необходимая для доведения ее до критического состояния. После этого экспериментатор покидает зал, и дальнейшие манипуляции со сборкой (сближение верхней и нижней частей, диагностические измерения и др.) осуществляются дистанционно из пультной, отделенной от зала многослойной бетонной защитой.

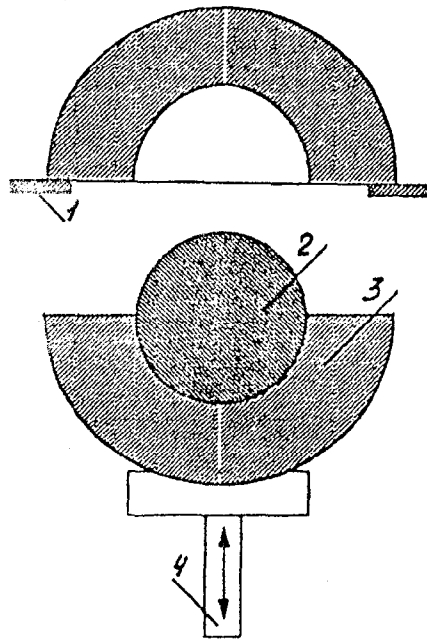


Схема стенда: 1 — неподвижная часть стенда с верхним фрагментом сборки; 2 — делющийся материал; 3 — отражатель; 4 — подвижная часть стенда

После того как сборка приведена в критическое состояние, она представляет собой по существу быстрый реактор очень малой мощности. Такая система обладает свойством саморегуляции — если мощность реактора повышается, это приводит к нагреву материала, его тепловому расширению и как следствие к уменьшению критичности, т.е. к снижению мощности. Таким образом, если резко повысить критичность сборки, в ней произойдет всплеск нейтронного излучения, затем оно резко спадет до уровня ниже исходного, потом снова начнет расти и после нескольких колебаний установится режим постоянной мощности излучения. При проектировании зданий для проведения подобного рода работ предусматриваются меры защиты от максимально неблагоприятного сценария аварийного развития событий. Таким сценарием является резкое переключение сборки через критическое состояние, когда быстрый нагрев может привести к плавлению ее материалов. При этом расплавление активной зоны автоматически прерывает цепную реакцию, но внутреннее помещение зала оказывается загрязненным. Достижение температуры плавления сопровождается мощным нейтронным излучением, и именно для защиты от него стены зала проектируются по жестким нормам радиационной защиты.

Что же произошло на стенде ФКБН-2М 17 июня 1997 г.? Экспериментатор проводил контрольную сборку ранее хорошо изученной системы, содержащей в своем составе высокообогащенный уран и медный отражатель. Будучи опытным работником, проведшим ранее несколько сот критических экспериментов, он в данном случае был твердо уверен, что работает с хорошо известной системой и не ждал никаких «сюрпризов». Начав сборку, он на каком-то этапе, видимо, в чем-то засомневался, разобрал часть конструкции и снова начал сборку, не поставив внутрь контрольный («затравочный») источник нейтронов — система защиты при этом не потеряла свою работоспособность, так как источник оставался вблизи сборки, однако значительно снизила чувствительность. Следует также отметить, что среди ранее изученных систем есть несколько похожих критическихборок — они эквивалентны по итоговому состоянию, но критичность в них достигается разными средствами, условно говоря, одна сборка содержит «много урана и мало меди», другая — «мало урана и много меди». Напомним, что все полусферы, используемые в экспериментах, имеют стандартизованные размеры, т.е. в описанияхборок фигурируют одни и те же числовые значения радиусов их составных частей. В системе с большим количеством меди следовало соответственно установить в сборку меньшее количество урана, однако в итоге собранной оказалась конструкция, в которой было «много урана и много меди».

В момент, когда экспериментатор устанавливал медную полусферу, система была уже близка к критической. Если бы «затравочный» источник был бы внутри сборки, то несомненно информация о близости системы к критическому состоянию проявилась бы вовремя, но источник находился снаружи. В этот момент полусфера выскользнула из рук в резиновых перчатках и упала на ранее собранную на нижней части стенда урановую сферу в половине медного отражателя. При этом перегруженная ураном нижняя часть сборки перешла через критическое состояние, что сопровождалось световой вспышкой, тепловой волной и срабатыванием аварийного сброса нижней части стенда (эта мера предусмотрена для работы в режиме дистанционного перемещения платформы стенда из пультовой). Поняв, что произошла ядерная авария, экспериментатор быстро покинул зал и закрыл защитные двери зала, изолировав его тем самым от смежных помещений. О происшедшем он известил руководство и был срочно госпитализирован.

Перед прибывшими на место происшествия специалистами прежде всего встала задача определения итогового состояния сборки и вероятных побочных последствий аварии, помимо начальной интенсивной нейтронной вспышки, ставшей непосредственной причиной переоблучения экспериментатора.

Приблизительно к 13:00 было твердо установлено, что, во-первых, в зале отсутствуют аэрозольные и пылевые загрязнения, во-вторых, сборка находится в излучающем состоянии, т.е. критическом режиме. При штатном режиме работы осуществляется постоянный контроль нейтронного потока в зале с помощью многодиапазонной системы нейтронных датчиков. После аварии на всех диапазонах, кроме последнего, произошло зашкаливание показаний, с помощью канала, сохранившего работоспособность, можно было в ограниченных пределах контролировать относительные изменения в нейтронном потоке из сборки. Отсутствие аэрозольных загрязнений указывало на то, что при аварии не произошло разрушения активной зоны, стабильность нейтронного потока свидетельствовала о достижении равновесного (саморегулирующегося) режима цепной реакции в образовавшейся на стенде системе.

Визуальный контроль зала был возможен через перископ, кроме того, удалось получить несколько фотографий, сделанных из проема двери зала. Образовавшаяся система представляла собой урановую сферу в медной оболочке толщиной 8 мм, помещенную в полусферический медный отражатель внешним диаметром около 260 мм. Вся система располагалась в нижней части стенда, и стандартными средствами управления установкой изменить ее конфигурацию не представлялось возможным.

С технической точки зрения задача состояла в том, чтобы тем или иным способом дистанционно удалить часть материала сборки или изменить ее конфигурацию на менее «плотную». В распоряжении специалистов для этого имелся только дистанционно управляемый из пультовой мостовой кран, при этом подвеска каких-либо приспособлений на крюк этого крана также являлась нетривиальной задачей, так как доступ персонала в зал был исключен из-за высоких дозовых нагрузок. В соответствии с физическими особенностями критических систем приближение любого материала к аварийной сборке немедленно повышало ее реактивность, т.е. увеличивались поток нейтронов и общее энерговыделение. Таким образом, предлагаемые методы аварийной разборки должны были учитывать требование минимизации любой массы, приближаемой к системе в процессе ее вывода из критического состояния.

Техническая комиссия выработала и обсудила несколько десятков вариантов решения проблемы. Варианты включали различные методы дистанционного воздействия на сборку (механические, химические, использование прецизионной взрывной технологии, газовой и плазменной резки и др.). Из них были выбраны наиболее перспективные, по которым началась немедленная отработка в условиях лабораторий и соседнем экспериментальном зале аналогичного проекта. При отработке использовали специально изготовленные макеты аварийной сборки. Параллельно в теоретических подразделениях в массовом порядке проводили расчеты, моделирующие влияние тех или иных действий на критичность системы. Прогнозировали также нейтронные и тепловые характеристики для разных сценариев ликвидации.

Первым активным действием по ликвидации нештатной ситуации стала операция по эвакуации из зала контейнеров с оставшимися ядерными материалами, не использованными в сборке. Эта операция была выполнена с помощью робота, разработанного в МВТУ им. Н.Э. Баумана и доставленного во ВНИИЭФ подразделением МЧС России. После того как зал был полностью освобожден от этих материалов, специалисты приступили к выполнению основной части работы — дистанционному изменению конфигурации аварийного узла.

ИИЭФ

ила авария.
характер допу-
действия лиц,
с технической
е разъяснение

державших де-
акции деления
к и исследова-
ного оружия.
м. Сначала на
струкции, при
асти обеспечи-
вдущих работ.
конструкции.
за нейтронным
стояния сборки
отока от внут-
ме того, транс-
).

усферических
моделирования
личных мате-

положение, и
для доведения
инментатор по-
ой (сближение
ния и др.) осу-
ой от зала мно-

кое состояние,
р очень малой
регуляции —
к нагреву ма-
ие к уменьше-
ким образом,
зойдет всплеск
уровня ниже
льких колеба-
лучения. При
ода работ пре-
агоприятного
знарнем явля-
остояние, ког-
е материалов.
ски прерывает
азывается за-
проводается
щиты от него
ациональной за-

Результат был получен с помощью первого же опробованного метода, наиболее отработанного к моменту начала операции. С помощью того же робота на крюк мостового крана была подвешена на шланге тонко стенная коническая вакуумная присоска. Перемещением крана присоска была надета на верхнюю часть медной полусферы, закрывающей урановый шар. Возмущение реактивности при этом привело приблизительно к четырехкратному возрастанию нейтронного потока и тепловой мощности реакции. После включения вакуумного насоса и начала подъема сборка разделилась по одной из полусферических поверхностей контакта, что немедленно привело к остановке цепной реакции. После того как нейтронный поток снизился до фонового, сборка была перемещена с помощью крана на резервную металлическую подставку и оставлена в таком положении для последующей окончательной разборки. Тем самым около 1:20 ночи 24 июня 1997 г. операция по ликвидации нештатной ситуации на стенде ФКБН-2М была завершена.

Естественно, в нашем описании опущены многие технические подробности, в частности, организация системы теленаблюдения за залом, детали операции по эвакуации контейнеров, процедура подвески при способлении на крюк и др. По результатам работы подготовлены подробные технические отчеты с описанием всех деталей работы, а также альтернативных подходов к ликвидации аварии, которые были в значительной степени экспериментально отработаны в процессе подготовки основной операции.

ПУНИН В.Т., СМИРНОВ И.Г., ЗЫКОВ С.А.
(РФЯЦ — ВНИИЭФ)

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Содержание статей должно быть изложено с предельной ясностью и краткостью. Следует избегать повторения данных таблиц и графиков, а также представления числовых результатов в виде таблиц и графиков одновременно. Объем статьи — 12 с. машинописного текста (включая рисунки с подписями, таблицы и библиографию).

При подготовке рукописей авторы должны руководствоваться следующими правилами:

1. Тексты и иллюстрации представляются в окончательно отработанном для печати виде в двух экземплярах (один из них — обязательно первый экземпляр). Текст должен быть отпечатан через два интервала по 28—29 строк на одной стороне листа.

2. Оформляются тексты (формулы, греческие и латинские, строчные и прописные буквы, сокращение слов и т.д.) в соответствии с общими правилами, принятыми в научно-технических журналах. Трудноразличимые рукописные буквы и знаки должны быть пояснены на полях.

3. Физические величины должны быть даны в единицах СИ.

4. Таблицы печатаются на отдельных листах и нумеруются по порядку, каждая таблица должна иметь заголовок; рисунки выполняются на компьютере; фотографии должны быть контрастными. Подписи к рисункам прилагаются на отдельном листе. В тексте должны быть ссылки на рисунки.

5. Список использованной литературы приводится в конце работы. Для журнальных статей указываются: фамилии и инициалы всех авторов, если их не более четырех, если более, то трех первых, а затем «и др.», название статьи, журнала, год, номер тома и выпуска, страницы (от — до), для книг — фамилии и инициалы авторов так же, как для журналов, полное название, место издания, издательство, год; для статей в сборниках — фамилии и инициалы авторов статьи, название статьи, название сборника, номер части, выпуска, место издания, издательство, год, страницы (от — до).

6. К статье должна быть приложена аннотация (объемом 1/3 машинописной страницы) с изложением цели и результатов работы, а также перевод на английский язык фамилий авторов и названия статьи.