



UA0300458

## МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ВО ВРЕМЯ ВТОРОЙ СТАДИИ АВАРИИ НА ЧАЭС

*А. Таралон*

*Институт проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАНУ, Украина*

В Институте проблем моделирования в энергетике им. Г. Е. Пухова НАН Украины (ИПМЭ НАНУ) разработаны математические модели и комплекс программ, позволившие исследовать процессы тепломассопереноса во время аварии на ЧАЭС.

Авария на четвертом энергоблоке ЧАЭС произошла 26 апреля 1986 г. в 01 ч 23 мин 40 с (время московское) в ходе проведения проектных испытаний. Рассмотрим хронологическую последовательность событий, происходивших на четвертом блоке Чернобыльской АЭС непосредственно перед аварией.

Из записи в оперативном журнале 26 апреля 1986 г.:

Время	События
00.05	Продолжена разгрузка энергоблока. Тепловая мощность реактора составила 720 МВт
00.28	При тепловой мощности реактора около 500 МВт допущено снижение тепловой мощности до 30 МВт (нейтронной – до нуля)
00.41	Отключен от сети турбогенератор ТГ-8 для снятия характеристик на холостом ходу
01.03	Включен в работу седьмой главный циркуляционный насос (ГЦН-12) в левой стороне реактора. Мощность реактора стабилизирована на уровне 200 МВт
01.06	Для восстановления парового уровня в барабанах-сепараторах (БС) поступление питательной воды превышает 1200 – 1400 т/ч
01.07	Включен в работу восьмой ГЦН-22 в правой стороне реактора
01.09	Резко снижен расход питательной воды до 90 т/ч на правой стороне реактора и до 180 т/ч на левой стороне при общем расходе по контуру – 56 000 – 58 000 т/ч. Температура на всасе ГЦН – 280,8 °С (левая сторона) и 283,1 °С (правая сторона)
01.23.40	Нажата кнопка аварийной защиты АЗ-5. Стержни начинают входить в активную зону реактора

После отключения от сети ТГ-8 вся энергия, выделяемая в активной зоне реактора, расходовалась на нагрев питательной воды, поступающей в БС с температурой 170 °С. Действительно, если указанный расход питательной

воды (1200 – 1400 т/ч) умножить на среднюю объемную теплоемкость воды и на разность температур воды в БС и питательной воды (113 °С), получим мощность 200 МВт.

Через двадцать восемь минут после отключения от сети ТГ-8 и две минуты после включения в работу восьмого ГЦН-22 зафиксировано резкое снижение расхода питательной воды по левой стороне до 180 т/ч (мощность 27 МВт), по правой – до 90 т/ч (мощность 13,5 МВт). При этом интегральная мощность реактора осталась на уровне 200 МВт. Из этого можно сделать два вывода: мощность была поднята только в одном (юго-восточном) квадранте, а в других осталась на уровне 13,5 МВт; в указанном квадранте прекратился теплообмен.

Кризис теплообмена второго рода (резкое ухудшение теплоотдачи) наблюдается при полном высыхании пристенной жидкости вокруг ТВЭЛов в дисперсно-кольцевом потоке жидкости, когда паросодержание достигает значения  $X_{гр}$  (25 – 30 % пара).

При работе восьми ГЦН расход воды через реактор увеличился примерно в 1,4 раза (56 000 – 58 000 т/ч). Соответственно увеличилось падение давления на запорно-регулирующих клапанах. Из-за недостаточного количества питательной воды температура воды в БС повышалась. Когда температура достигла значения 283,1 °С (вместо 270 °С), мощности 200 МВт оказалось достаточно, чтобы при пониженном давлении образовалось 25 – 30 % пара. Таким образом, малая величина недогрева теплоносителя до состояния кипения, малая величина запаса по давлению и большая неравномерность энерговыделения в реакторе привели к образованию кризиса теплообмена второго рода.

Полученное при моделировании на различных моделях прогнозное время (примерно 15 мин от образования кризиса теплообмена второго рода до разрушения ТВЭЛ) хорошо согласуется со временем (14 мин 43 с), указанным в хронологии событий. Нами установлено, что процесс разрушения реактора начался за 14 мин 42 с до нажатия на кнопку АЗ-5. Таким образом, авария на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС началась в 01.09. Реактор необходимо было остановить.

Установление факта возникновения в реакторе кризиса теплообмена второго рода, приведшего к закупорке каналов и испарению теплоносителя в активной зоне до нажатия кнопки АЗ-5, полностью объясняет причину катастрофического роста нейтронной мощности в 1/8 части активной зоны реактора. Образование пара в реакторе привело к разгону реактора на быстрых нейтронах за счет положительного парового коэффициента реактивности. Этот процесс должен был компенсироваться за счет ввода стержней автоматической защиты АЗ-5. Конструктивный недостаток реактора – эффект положительного выбега реактивности от вытеснителей – при вводе их в активную зону реактора, заполненную паром, привел к увеличению реактивности в нижней части активной зоны и ускорению процесса разрушения.

Таким образом, нами установлено, что основной причиной аварии на ЧАЭС является возникновение в реакторе кризиса теплообмена второго рода, а не эффект положительного выбега реактивности от вытеснителей стержней системы аварийной защиты, как принято в официальной версии [1 – 4].

Доказано, что за указанное во многих работах время начальной стадии разрушения реактора (7 с), в случае увеличения плотности теплового потока выше  $q_{кр}$ , невозможен всплеск интегральной мощности за счет положительного парового эффекта, ввиду возникновения кризиса теплообмена первого рода [5].

Анализ результатов моделирования показал, что более 60 % топливосодержащих масс (черные ЛТСМ) образовалось за счет плавления песка из засыпки и бетонных стен плазмой во время локального разгона мощности в реакторе в процессе аварии, а не во время пожара на ЧАЭС. Температура в активной зоне во время аварии была более 6 000 °С. Во время аварии испарилась примерно 1/8 часть графита и топлива реактора, а на сублимацию и испарение потребовалось  $1,53 \cdot 10^9$  кДж тепла. Процесс длился примерно 60 с, поэтому средняя мощность составила 256 000 МВт, т. е. в 80 раз превышала номинальную тепловую мощность реактора (3 200 МВт). Таким образом, мы получили величину всплеска интегральной мощности, такую же, как была получена на модели Института атомной энергии им. И. В. Курчатова.

Нами, на основании анализа существующих печатных работ и результатов моделирования, установлено, что верхняя металлоконструкция (схема Е), поднимаясь вверх (первый взрыв), вытщила из 3/4 технологических каналов топливо, которое взорвалось в центральном зале (второй взрыв), разрушив всю верхнюю часть здания, что подтверждается следующим:

1. Основная часть ядерного топлива находится наверху, в разрушенном центральном зале реактора, и под сооруженной при строительстве объекта «Укрытие» каскадной стеной. Это – целые сборки и отдельные тепловыделяющие элементы, топливные таблетки. Они также обнаружены в верхних слоях топливосодержащих масс (ТСМ) в подреакторном помещении в нерасплавленном виде.

2. Установлен факт механического разрушения оболочек ТВЭЛов прямо в воздухе. Образовавшаяся во время взрыва высокоактивная пыль, состоящая из мелкодисперсных топливных частиц, внедрилась в бетонные стены, полы, потолки помещений, а также находилась в воздухе в виде аэрозолей, создавая сильнейшее радиационное заражение местности.

3. Максимальная мощность экспозиционной дозы (МЭД) для помещений ЧАЭС была на отметках 20 – 40 м.

Коричневые ЛТСМ образовались во время пожара за счет оставшегося в реакторе топлива.

Выброс радиоактивности определялся взрывом реакторного помещения и взрывом топлива в центральном зале реактора. Во время первой стадии аварии в окружающую среду вышла всего 1/4 часть суммарного выброса.

Результаты работ по восстановлению первой стадии аварии на ЧАЭС позволили создать модели для исследования процессов тепломассопереноса, происходивших на второй стадии аварии и происходящих до настоящего времени в объекте «Укрытие».

В начале второй стадии происходит образование коричневых ТСМ. Приблизительно через 20 ч после взрывов загорелись газы, образовавшиеся в результате окисления графита реактора. Струи пламени поднимались на высоту 50 м над разрушенным залом реактора и поэтому на нагрев ТСМ оказать влияния не могли. Пожар продолжался до 4 ч утра 27 апреля. Вместе с продуктами горения выбрасывались мелкодисперсные частицы топлива и продукты деления, сорбированные графитом. За счет радиоактивного распада продуктов деления во время всей второй стадии происходил также выброс радиоактивности, определяемый перегревом топлива.

Резкое уменьшение выброса радионуклидов после 5 мая, по нашему мнению, объясняется плавлением нижней металлической плиты схемы ОР и перемещением под нее в юго-западной четверти помещения 305/2, а также в парораспределительный коридор (ПРК) коричневых ТСМ.

Следует отметить, что о концентрации и количестве топлива в юго-восточной и юго-западной частях помещения 305/2 до настоящего времени определенных сведений нет.

Для исследования нестационарных процессов, происходивших во время образования коричневых ТСМ, и определения мест расположения ТСМ с большой концентрацией топлива в юго-западной четверти помещения 305/2 разработаны двумерные модели тепломассопереноса, учитывающие перемещения источников тепла и фазовые превращения, а также методика моделирования.

Полученные первые результаты показали, что остаточного тепловыделения топлива для проплавления нижней металлической плиты схемы ОР было бы недостаточно. Во время второй стадии аварии, по нашему мнению, в подреакторном помещении происходили самоподдерживающиеся цепные реакции, что подтверждают мощные залповые выбросы радионуклидов в апреле – мае 1986 г., а выбросы, происходившие после 5 мая, указывают на наличие ТСМ с большой концентрацией топлива в юго-западной четверти схемы ОР (отметка 13 м). Для определения концентрации топлива в этом месте необходимы данные о температуре на поверхности ТСМ.

Результаты моделирования показали, что трубы водяных коммуникаций и наличие конвективного теплообмена с нижним металлическим листом схемы ОР в западной половине помещения 305/2 обеспечивают интенсивное охлаждение коричневых ТСМ, находящихся на трубах и в схеме ОР. В связи с этим тепловая аномалия на потолке ПРК в этой части помещения не наблюдалась и замеры температур не проводились.

Разработаны модели для исследования процессов тепломассопереноса во время охлаждения черных ТСМ и образования коричневых ТСМ, которые по значениям температур, полученным в результате измерений в предыдущее

время, позволят определить количество топлива и степень разрушения пола в юго-восточной четверти помещения 305/2 по значениям температур в нем и ПРК. Для исследования процессов теплопередачи в объекте «Укрытие» за прошедшие 15 лет и прогнозирования поведения топливосодержащих масс (по полученным на модели и действительным значениям температур и тепловых потоков) разработана трехмерная математическая модель нестационарной теплопроводности объекта.

Предлагается создать постоянно действующий программно-технический комплекс для многовариантных прогнозов изменения состояния среды в объекте «Укрытие» и на его территории и обоснования проведения необходимых мероприятий во время его эксплуатации [6, 7].

Проведение предлагаемых исследований позволит более эффективно решать проблемы диагностики ядерной и радиационной безопасности объекта «Укрытие».

Ограниченность информационных и финансовых ресурсов задерживает проведение этих исследований в ИПМЭ НАНУ.

Для их продолжения необходимо объединение усилий специалистов объекта «Укрытие», Чернобыльского центра по проблемам ядерной безопасности и радиозащиты, МНТЦ «Укрытие», ИЯИ, ИПМЭ НАНУ при соответствующей финансовой поддержке заинтересованных министерств Украины и международной общественности.

#### Список литературы

1. *Тарапон А. Г.* Модели процессов тепломассопереноса во время аварии на Чернобыльской АЭС и в объекте «Укрытие». – К.: ИПМЭ НАНУ, 1998. – 150 с.
2. *Тарапон А. Г., Сорокин Н. А., Тернавский В. О.* Программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса при аварийных ситуациях // Методы и средства компьютерного моделирования. – К.: ИПМЭ НАНУ, 1997. – С. 58 – 60.
3. *Тарапон А. Г.* Моделирование процессов кризиса теплообмена в реакторах РБМК-1000 // 36. наук. праць ІПМЕ НАНУ. – Львів: Світ, 1998. – Вип. 2. – С. 13 – 24.
4. *Тарапон А. Г.* Моделирование процессов тепломассопереноса во время аварии на ЧАЭС // 36. наук. праць ІПМЕ НАНУ. – Львів: Світ, 1998. – Вип. 3. – С. 3 – 13.
5. *Тарапон А. Г.* Модели начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС // 36. наук. праць ІПМЕ НАНУ. – Львів: Світ, 1998. – Вип. 4. – С. 63 – 69.
6. *Тарапон А. Г.* Модели процессов тепломассопереноса в активной зоне и шахте реактора № 4 Чернобыльской АЭС во время аварии 26 апреля 1986 г. // Научные и технические аспекты международного сотрудничества в Чернобыле. – Славутич: Укратомиздат, 1999. – С. 449 – 460.
7. *Тарапон А. Г.* Создание моделирующего комплекса для прогнозирования ядерного и радиационного состояния украинских АЭС и объекта «Укрытие» // Тез. докл. на конф. междунар. Чернобыльского центра. – Славутич, 1999. – С. 52 – 53.

## MODELS OF FUEL MASSES TRANSITION DURING SECOND STAGE OF THE ACCIDENT ON CHERNOBYL NPP

*A. Tarapon*

*Institute of simulation in power engineering of NASU, Ukraine*

In ISPE NASU of Ukraine are developed mathematical models and software, which allow to research the processes of fuel masses transition during the accident at CHPP.

The accident on fourth power unit of CNPP has taken place on April 26, 1986 on 01 h 23 min 40 s (Moscow time) during project tests. Let's consider a chronological sequence of events, happened on the fourth block of Chernobyl NPP right before the accident.

### From entries in the operating log of April 26, 1986:

Time	Events
00.05	The unloading of power unit is continued. The thermal potency of the reactor has made 720 MWt
00.28	For thermal potency of the reactor about 500 MWt, has been made a drop of a thermal potency to 30 MWt (neutron – to zero)
00.41	Disconnected from a circuit turbo generator OG-8 for checking the idle performance
01.03	Seventh main circulating pump in left side of reactor (MCP-12) is turned on. The power of reactor is stabilized on the level of 200 MWt
01.06	For restoring a steam level in a separator drums (SD) the inflow of water exceeds 1200 – 1400 t/h
01.07	Turned on eighth MCP-22 in a right side of the reactor
01.09	Sharply reduced to 90 t/h the consumption of water in the right side of reactor and to 180 t/h on the left side with general consumption in circuit – 56 000 – 58 000 t/h. Temperature on the inlet of MCP – 280,8 °C (left side) and a 283,1 °C (right side)
01.23.40	The button of an emergency protection EP-5 is pressed. The rods begin to enter into active zone of the reactor

After a cut-off from a circuit TG-8 the whole energy made in active zone of the reactor was spent for heating of water arriving to SD with temperature 170 °C. Really, if the indicated consumption of water (1200 – 1400 t/h) is multiplied on an average volumetric thermal capacity of water and on a difference of temperatures of water in SD and water (113 °C), we receive a potency of approx. 200 MWt.

In twenty eight minutes after a cut-off from a circuit TG-8 and two minutes after inclusion in work of eighth MCP-22 is noted sharp drop of consumption of water on left side up to 180 t/h (potency 27 MWt), on right – up to 90 t/h (potency 13,5 MWt). The integrated potency of the reactor has remained at a level of 200 MWt. It is possible to make out of it two conclusions: the potency was lifted only in one (south-east quadrant), and in other has remained at a level of 13,5 MWt; in the indicated quadrant the heat exchange was stopped.

The crisis of heat exchange of the second sort (sharp deterioration of heat exchange) is observed with full drying of near wall liquid around power elements in a disperse-ring fluid flow, when vapor level reaches a value Ogr (~ 25 – 30 % of vapor).

With a work of eight MCP the consumption of water through the reactor was increased approximately in 1,4 times (56000–58000 t/h). The falling of pressure on close-regulating valves was accordingly increased. Because of insufficient amount of water, the temperature of water in SD increased. When temperature has reached a value of 283,1 °C (instead of 270 °C), potency of 200 MWt has appeared enough to make 25 – 30 % of vapor in reduced pressure. Thus, small amount of non-heating of the heat-carrier up to the condition of boiling, small amount of pressure reserve and large non-uniformity of energy release in the reactor have resulted information of crisis of heat exchange of the second sort.

Obtained in simulation on various models expected time (approximately 15 min from formation of crisis of heat exchange of the second sort before destruction of power elements) is well coordinated with time of 14 min 43 s indicated in chronology of events. We found out, that process of destruction of the reactor started 14 min 42 s before pressing a button EP-5. Thus, the accident on 4-th power unit of Chernobyl NPP was begun at 01.09. It was necessary to stop the reactor.

The investigation of the fact of happening of crisis of heat exchange of the second sort in the reactor which resulted in blockage of channels and evaporation of the heat-carrier in active zone until pressing the button EP-5, completely explains the reason of disastrous growth of a neutron potency in 1/8 part of active zone of the reactor. Formation the vapor in the reactor has reduced in speeding up of the reactor on fast neutrons at the expense of positive steam factor of reactivity. This process had to be compensated at the expense of input of rods of automatic protection EP-5. A design shortage of the reactor – the effect of positive output of reactivity from displacers – while inputting them into the zone of reactor, full of vapor, resulted in magnification of a reactivity at the bottom part of active zone and acceleration of process of destruction.

Thus, we found out, that the main reason of accident on CNPP is the happening in the reactor of crisis of heat exchange of the second sort, instead of the effect positive output of reactivity from displacers of rods of system of emergency protection, as is accepted in official version [1 – 5].

It is proved, that for the time of an initial stage of destruction of the reactor, indicated in many works (7 s), in case of magnification of density of a heat flow over qcr splash of an integrated potency is impossible at the expense of positive steam effect in an aspect of origin of crisis of heat exchange of the first sort [6].

The analysis of results of simulation has shown, that more than 60 % fuel containing masses (black LFCM) formatted due to melting of sand from a filling and concrete walls by plasma during local speeding up of potency in the reactor during accident, instead of during a fire on CNPP. Temperature in active zone during accident was more than 6 000 °C. During accident was evaporated approximately 1/8 part of graphite and fuel of the reactor, and sublimation and evaporation took  $1,53 \cdot 10^9$  kDj of heat. The process lasted approximately 60 s, therefore average potency made 256 000 MWt, i.e. in 80 times exceeded a nominal thermal potency of the reactor (3 200 MWt). Thus, we have received magnitude of splash of an integrated potency; the same was obtained on a model of Institute of an atomic energy of Kurchatov.

Basing on analysis of existing printed works and results of simulation we found out, that upper steel construction (scheme A), being lifted up (first explosion), has dragged from 3/4 technological channels fuel, which has blown up in a central hall (second explosion), destroying the whole top of a building that is confirmed:

1. The main part of nuclear fuel is in destroyed central hall of the reactor and under constructed cascade wall of «Shelter». Those are assemblies and separate power elements, fuel tablets. They also are detected in top layers fuel containing masses in sub-reactor room in non-melted state.
2. The fact of mechanical destruction of cores of power elements directly in the air is also established. Formed during explosion high activity dust consisting of small disperse fuel parts, has taken root into concrete walls, floors, ceilings, and also was in the air as aerosols, creating strongest radiation infection of district.
3. Maximum potencies of an exposition doze (MED) for rooms of CNPP were on marks of 20 – 40 m.

Brown LFCM were formed during a fire at the expense of heat release of left in reactor melted fuel.

Radioactive pollution was defined by the explosion of reactor zone and fuel in central reactor hall. During first stage of the accident the environment was polluted only with j of all radioactive parts.

The result of work on reconstruction of the first stage of the accident on CNPP allowed to create models for research of processes of fuel masses transition, which took place at the second stage of the accident, and taking place till now in «Shelter» object.



At the beginning of the second stage were formed brown FCM. Approximately in 20 h after the explosion, the gases, formed as the result of the reactor graphite oxidation started burning. The flame reached 50 m above the destroyed reactor hall and that's why it could not heat the FCM. The fire was until 4.00 am of April 27. Along with the products of burning were ejected the small particles of fuel and separation products, being sorbed by the graphite. During the second stage also took place the radioactive pollution defined by overheating of fuel due to radioactive disintegration of separation products.

The abrupt decrease of radio nuclides throw out after the 5th of May, by our opinion, is explained by melting of lower metal plate of the scheme OR and the movement of brown FCM under it in south-western quarter of room 305/2, and also into vapour distribution corridor (WDC).

It's worth to mention, that until now there are no clear data about concentration and amount of fuel in south-eastern and south-western parts of room 305/2.

For investigation of non-stationary processes, taking place during formation of brown FCM and definition of location of FCM with the high concentration of fuel in south-western quarter of room 305/2 are developed 2-dimension models of fuel masses transition, which take into account the transition of heat sources and phase conversions and also the methods of simulation.

The received first results showed, that the rest heat emission of fuel is not enough for melting the lower metal plate of scheme OR. During the second stage of the accident, by our opinion, in subreactor room happened self-supporting chain reactions, which is confirmed by powerful shooting ejections of radionuclides in April-May 1986, and ejections, taking place after the 5th of May show the presence of FCM with the high fuel concentration in south-western quarter of scheme OR (the 13 m mark). For definition of fuel concentration in that place are required data on temperature at the surface of FCM.

The result of simulation showed, that pipes of water communications and presence of convective heat exchange with the lower metal plate of scheme OR in the western part of room 305/2 make possible the intensive cooling of brown FCM, located in pipes and scheme OR. That's why the heat abnormality at the ceiling of PRK is not seen and temperature measurements at the surface of FCM in that part was not made.

Are developed models for research of heat masses transition during cooling of the black FCM and formation of brown FCM, which allow to define the amount of fuel and level of destruction of the floor in south-eastern quarter of room 305/2 by the measurements of temperature in it and PRK, received before.

For research of processes of heat exchange in object «Shelter» for the past 15 years and forecasts of behaviour of FCM (by received at the model and real temperatures

and heat streams) is developed 3-dimension mathematical model of non-stationary heat conduction of object.

It is offered to create constantly operating program-engineering complex intended for the multialternative prediction of modification of condition of medium in «Shelter» and its territory and substantiation of necessary measures on security of nuclear and radiation safety of plant during its operation [6, 7].

The conduction of proposed research will allow to solve problems of diagnostics of nuclear and radioactive safety of object «Shelter» more effectively.

The limited information and financial resources are delaying the conduction of those researches in ISPE NASU.

For their continuation is required to join the efforts of object «Shelter», Chernobyl Center on Problems of Nuclear Safety and Radioecology, ISTC «Shelter», INR, ISPE NASU with appropriate financial support of interested ministries of Ukraine and international community.

#### References

1. *Tarapon A. G.* Models of processes heat masses transition during accident on Chernobyl NPP and in «Shelter». – K.: IPSPE NAS of Ukraine, 1998.
2. *Tarapon A. G., Sorokin N. A., Ternevskiy V. I.* A program complex for simulation of processes heat masses transition on emergencies. // Col. Methods and tools of computer simulation. – K.: IPSPE NASUK, 1997. – P. 58 – 60.
3. *Tarapon A. G.* Simulation of processes of crisis of heat exchange in reactors DBMK-1000 // Col. of scientific works IPSPE NASU. – Lviv: Svit, 1998. – Issue 2. – P. 13 – 24.
4. *Tarapon A. G.* Simulation of processes of heat masses exchange during accident on CNPP // Col. of scientific works IPSPE NASU. – Lviv: Svit, 1998. – Issue 2. – P. 3 – 13.
5. *Tarapon A. G.* Models of an initial stage of accident on Chernobyl NPP // Col. of scientific works IPSPE NASU. – Lviv: Svit, 1998. – Issue 2. – P. 63 – 69.
6. *Tarapon A. G.* Models of processes heat masses exchange in active zone and shaft of the reactor 4 of Chernobyl NPP during accident on April 26, 1986 // Col. Scientific and engineering aspects of international cooperation in Chernobyl. – Slavutich: Ukratomizdat, 1999. – P. 449 – 460.
7. *Tarapon A. G.* Creation of a simulating complex for prediction of nuclear and radiation condition in Ukrainian NPPs and «Shelter» // Theses of the reports of conference of international Chernobyl center. – Slavutich, 1999. – P. 52 – 53.