

## РАЗРАБОТКА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ОПЕРАТИВНОГО АНАЛИЗА И ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

**Ю.М. Волков\*, С.Т. Лескин\*, Ю.Д. Баранаев\*\*, А.И. Воропаев\*\*,  
М.Ф. Воротынцев\*\***

*\* Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,  
г. Обнинск*

*\*\* ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск*



Изложен подход к разработке программной системы для экспресс-прогноза последствий радиационной аварии на ядерной энергетической установке (ЯЭУ). Система интегрирует наработки ГНЦ РФ-ФЭИ в области атмосферного переноса радиоактивности. Описан алгоритм уточнения параметров выброса радиоактивности по показаниям датчиков автоматизированной системы контроля радиационной обстановки (АСКРО) и первым результатам радиационной разведки. Для визуализации результатов расчета использована платформа MapInfo и цифровые карты местности.

В течение последних лет концерн «Росэнергоатом» активно ведет работы по совершенствованию системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (СПЧС). Эти работы направлены на совершенствование системы управления противоаварийными действиями, модернизацию информационного и программного обеспечения, систем видеоконференцсвязи и передачи данных.

Одним из составляющих элементов СПЧС является Центр технической поддержки (ЦТП), расположенный в ГНЦ РФ-ФЭИ. Центр выполняет функцию инженерно-технической и информационной поддержки Кризисного центра (КЦ) концерна «Росэнергоатом» как в режиме нормальной эксплуатации, так и при чрезвычайных ситуациях на Белоярской и Билибинской АЭС.

Ниже изложено состояние, имеющихся и разрабатываемых в ЦТП, программных средств оперативного анализа и прогноза последствий выхода за барьеры безопасности значимых количеств радиоактивности.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наиболее ответственным в работе ЦТП является аварийное реагирование при запуске протекания аварии на реакторной установке (РУ) с выходом радиоактивности. В условиях стресса и дефицита времени необходимо оперативно

- оценить состояние и идентифицировать причины аварии;

© Ю.М. Волков, С.Т. Лескин, Ю.Д. Баранаев, А.И. Воропаев, М.Ф. Воротынцев, 2005

- дать прогноз развития возможного сценария развития аварии, ее масштаба и последствий;

- дать рекомендации по приведению РУ в безопасное состояние.

На первом этапе последовательность действий сводится к следующему:

- используя всю доступную информацию и знания экспертов, оценить изотопный состав и мощность выброса;

- используя вычислительные средства оперативного расчета, оценить поражение окружающей среды и воздействие на население;

- используя показания датчиков АСКРО, уточнить параметры выброса и его последствия;

- используя данные системы автоматизированного контроля радиационной безопасности (АКРБ), а затем радиационной разведки, уточнить прогноз радиационной обстановки на промплощадке, в помещениях РУ и на местности.

В ГНЦ РФ-ФЭИ сегодня имеется достаточно большой набор вычислительных кодов, способных решать указанные задачи. Эти коды использовались в работах по анализу безопасности БАЭС и БиАЭС. Однако для условий ЦТП их прямое использование затруднено (или даже невозможно), т.к.

- они создавались для решения широкого класса задач, и поэтому не учитывают особенности конкретных ЯЭУ, а также имеют сложную систему подготовки исходных данных;

- они разрабатывались в разное время, разными людьми, во многих случаях без соблюдения стандартов и норм, предъявляемых к программному продукту;

- проведение расчетов по этим кодам затруднено без присутствия их авторов.

Основной целью работы являлось создание на базе имеющихся программных средств и вычислительных кодов, оперативной и максимально простой в использовании программной системы для решения задач ЦТП. Предполагается, что данная система может быть использована для различающихся по технологии реакторов БН-600 и ЭГП-6.

### **ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА И ПРОГНОЗ РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ НА МЕСТНОСТИ ПРИ АВАРИИ С ВЫХОДОМ РАДИОАКТИВНОСТИ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Исторически для решения задач такого класса в ГНЦ РФ-ФЭИ развивались две вычислительных программы: «ВЫБРОС» [1] (с начала 80-х годов) и «AERO» [2] (с середины 90-х годов). Программа «ВЫБРОС» использовалась для обоснования безопасности БиАЭС и установок малой энергетики (РУТА, Волнолом). Программа «AERO» изначально была ориентирована на особенности реакторов с натриевым теплоносителем. В ней были учтены физико-химические процессы, связанные с образованием и атмосферным переносом натриевых аэрозолей при течах и горении натрия, трансформация их химической формы, изменения плотности, размеров частиц в зависимости от влажности и т.д. Оба кода опираются на модель переноса примесей в атмосфере, в основе которой лежит распределение Гаусса [5], а также на рекомендации основных норм и правил учета погодных условий и микрорельефа.

По ряду причин (документированность, полнота расчета дозовых функционалов, удобство интеграции с картографической информацией), а также возможность применения для двух разных типов энергоблоков (БН-600, ЭГП-6), за основу программной системы ЦТП была взята программа «ВЫБРОС». Для нее был разработан интерфейс совместной работы программы с картографической системой MAPINFO и цифровыми картами местности, дополнительно разработан вычислительный блок, учитывающий специфику атмосферного переноса натриевых аэрозолей. Была создана и интегрирована в разрабатываемую систему база данных, содержащая данные по

возможным радиационным авариям на реакторе БН-600 (радионуклидный состав, активности нуклидов, высота выброса, скорости истечения и температура выброса, типовые сезонные погодные условия).

Примерное время подготовки исходных данных и расчета одного варианта составляет менее двух минут. По окончании расчетов система автоматически генерирует (в соответствии с требованиями организационных и нормативных документов, в частности, НП-005-98 [3] и НРБ-99) форму донесения ЦТП в КЦ концерна «Росэнергоатом». Созданная система в настоящее время проходит комплексное тестирование.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЩНОСТИ И ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫБРОСА РАДИОАКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОКАЗАНИЙ ДАТЧИКОВ АСКРО**

Дополнительно к описанному алгоритму расчета был разработан алгоритм решения обратной задачи – оценка (уточнение) параметров выброса по реальной (или заданной в ходе тренировки) радиационной обстановке. Данный расчет может использоваться при проведении противоаварийных тренировок и для уточнения параметров исходного выброса в случае аварии, уточнения ее причины.

В настоящее время на всех 10 АЭС России реализован сбор и передача, в режиме реального времени, данных автоматизированных систем контроля радиационной обстановки (АСКРО) в санитарно-защитной и зоне наблюдения АЭС. Показания АСКРО являются важным источником информации для оценки масштаба и временного развития реальной радиационной аварии. На их основе может быть уточнена мощность и временные характеристики выброса радиоактивности. Ниже описан механизм расчета, который фактически является обратным по отношению к задаче расчета радиационных последствий от заданного выброса радиоактивности. Отметим, что в качестве исходных данных в прямой задаче используются консервативные (с запасом) данные технического анализа безопасности.

Мощность  $\gamma$ -дозы, регистрируемая датчиком АСКРО, складывается из трех компонент:

- мощности фонового  $\gamma$ -излучения, характерного для местности, где установлен датчик АСКРО;
- мощности  $\gamma$ -излучения от проходящего над пунктом АСКРО облака радиоактивных примесей;
- мощности  $\gamma$ -излучения от радиоактивных примесей, осевших из облака на поверхность почвы, строений и растительности.

Выбросы радиоактивности при возможных запроектных авариях [4] могут быть однократными (рис. 1) и многократными (рис. 2). Для БН-600 однократный выброс характерен при запроектных авариях, связанных с течью натрия из вспомогательных трубопроводов 1-го контура и последующим горением пролитого натрия. Длительность такого выброса радиоактивности может достигать десятков часов. Типичные кривые зависимостей мощности выброса  $Q(t)$  и мощности  $\gamma$ -дозы  $P_\gamma(t)$  для этого случая показаны на рис. 1: время запаздывания  $t_{\text{зап.}}$  прибытия облака выброса в точку пункта АСКРО относительно начала выброса, момент начала регистрации мощности  $\gamma$ -дозы от прибывшего облака примесей  $t_{01}$  и момент  $t_{A1}$  окончания поступления информации о радиационной обстановке в точке пункта АСКРО в ЦТП ФЭИ, обусловленной прошедшим облаком выброса.

Картина выбросов радиоактивности, характерных для запроектных аварий, связанных с возможной потерей системного и надежного энергоснабжения энергоблока соответствует рис. 2. В этом случае для БН-600, при возможных разгерметизациях твэлов и даже расплавлении части ядерного топлива радиоактивные газы и летучие продукты деления поступают в газовую подушку корпуса реактора и затем в га-

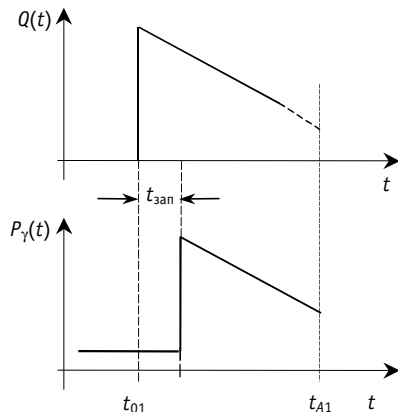


Рис. 1. Характерная зависимость мощности однократного выброса и соответствующей мощности  $\gamma$ -дозы

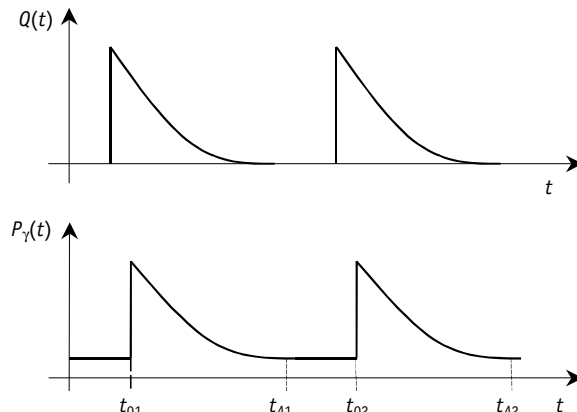


Рис. 2. Характерная зависимость мощности многократного выброса и соответствующей мощности  $\gamma$ -дозы

зовую полость бака-компенсатора давления. При превышении порогового давления газа в последней, срабатывает гидрозатвор основного корпуса реактора и радиоактивные продукты деления попадают в вентиляционную трубу, работающую в этом случае на самотяге. Возможно несколько срабатываний гидрозатвора. Длительность каждого выброса может составлять от 10 до 20 мин.

Каждой из запроектных аварий соответствует максимальная (расчетная) интегральная мощность выброса  $Q^{\max}$  и изотопный состав выбрасываемых радиоактивных нуклидов.

После того как в ЦТП поступила информация об исходном событии, сопутствующих отказах и соответствующих им моментах времени, можно практически однозначно идентифицировать тип запроектной аварии и, следовательно, максимальную интегральную мощность выброса  $Q^{\max}$  [Бк], изотопный состав выброса, тип выброса – газовый, обычные или натриевые аэрозоли.

Через некоторое время, зависящее от значения скорости ветра, в ЦТП поступают первые данные показаний датчиков АСКРО, т.е. становится известна зависимость мощности дозы во времени  $P_\gamma(t)$  [мкЗв/ч] на интервале  $0 \div t_A$ . Требуется по этой зависимости оценить реальную интегральную мощность выброса  $Q$  и его распределение по времени.

Для решения обратной задачи используется возможность программы «ВЫБРОС» провести расчет выброса прямоугольной формы (рис. 3).

Левый фронт такого прямоугольного выброса соответствует моменту времени  $t=0$ , правый фронт ступеньки отстоит на величину задаваемой длительности выброса  $T_p$ . Дополнительно в программе используется следующий набор временных параметров:

- $t_1$  – время прибытия реципиента в точку;
- $t_2$  – время, за которое рассчитываются дозовые функционалы, отсчитываемое от момента  $t_1$ , причем  $TV = t_2 - t_1$ ;

- $TT$  – время, за которое производится расчет.

Программа «ВЫБРОС» не рассчитывает непосредственно мощности доз, но за счет ее автоматических многократных запусков можно организовать расчет кривой мощности дозы  $P_\gamma(t)$ , что требуется для предлагаемой методики решения обратной задачи. Далее предполагаем, что расчет кривой мощности дозы  $P_\gamma(t)$  выполнен. Суть предлагаемой методики легко понять из рис. 4.

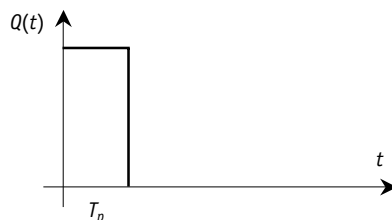


Рис. 3. Ступенчатая зависимость мощности выброса во времени

Ступенчатый прямоугольный выброс  $Q(t)$  длительностью  $T_p$  начинается в момент времени  $t' = 0$ , где  $t'$  – собственная ось времени программы «ВЫБРОС». Кроме этой оси времени, в методике будет использована ось реального времени  $t$  (например, рис. 1, 2).

Поскольку информация о показаниях датчиков АСКРО поступает в ЦТП в реальном времени, спустя время  $t_{\text{зап}}$ , облако выброса прибывает в окрестности пункта АСКРО и датчики АСКРО регистрируют левый фронт кривой  $P_\gamma(t)$ . Мощность  $\gamma$ -дозы будет слегка расти в течение времени  $t_p$  (рис. 4), это обусловлено увеличением осадения радиоактивности за время про-

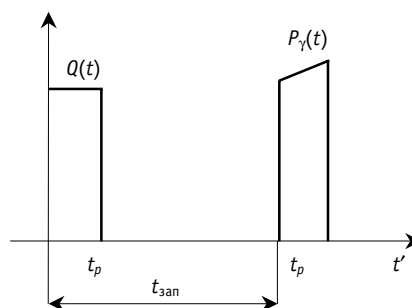


Рис. 4. Ступенчатый выброс мощностью  $Q(t)$  начинается в момент времени  $t = 0$ , соответствующая ему мощность дозы начинает регистрироваться спустя время  $t_{\text{зап}}$

хождения облака  $t_p$ . Затем мощность дозы резко снижается до значения, равного сумме фоновой мощности дозы и мощности дозы от загрязненной поверхности  $P_{\text{ГАП}}$ . Заметим, что существенный вклад в мощность дозы  $P_\gamma$  регистрируемой датчиком АСКРО, дает  $\gamma$ -излучение разбавленной радиоактивности облака. Поэтому форма «импульса»  $P_\gamma(t)$  практически совпадает с формой «импульса» выброса  $Q(t)$ .

Выброс произвольной формы может быть представлен в виде совокупности последовательных прямоугольных выбросов. Как показано выше, форма кривой  $P_\gamma(t)$  практически совпадает с формой кривой  $Q(t)$ . Используя это обстоятельство, легко построить алгоритм решения обратной задачи.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные программные средства успешно прошли апробацию при проведении учебных тренировок и комплексных противоаварийных учений на БАЭС в сентябре 2004 г.

В настоящее время возможности системы расширяются за счет создания модуля позволяющего в случае аварии моделировать распространение радиоактивности по помещениям энергоблока, оценивать радиационную обстановку в помещениях и величину выброса в окружающую среду, учитывая показания датчиков системы АКРБ в помещениях энергоблока.

Авторы благодарны Б.Л. Шиленко и Р.И. Мухамадееву за большую работу по комплексной интеграции системы.

## Литература

1. Баранав Ю.Д., Суворов А.П., Мухамадеев Р.И. Руководство пользователя программы ВЫБРОС-2 при анализе радиационных последствий выбросов радиоактивности в атмосферу: Отчет ГНЦ РФ-ФЭИ. – Обнинск, 1997.
2. Ivanenko V.N., Zybin V.A., Bakuta N.N. The «AERO» computer code/International Topical Meeting «SODIUM COOLED FAST REACTOR SAFETY» (Obninsk, Russia, October 3-7, 1994). – V. 3.
3. Положение о порядке объявления аварийной обстановки, оперативной передачи информации и организации экстренной помощи атомным станциям в случае радиационно опасной ситуации. Госатомнадзор России от 30.08.02, №8.
4. Белоярская АЭС. Блок №3. Техническое обоснование безопасности атомной станции с энергоблоком БН-600. Альбом 5. Раздел 4.4. Анализ запроектных аварий и мероприятия по управлению запроектными авариями. – Санкт-Петербургский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Атомэнергопроект», 1994.
5. Гусев Н.Г., Беляев В.А. Радиоактивные выбросы в биосфере: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

Поступила в редакцию 21.03.2005

## ABSTRACTS OF THE PAPERS

### УДК 621.039.58

*The Development of Specialized Software for Fast Radiation Conditions Analysis and Accident Evolution Forecasting in Case of Nuclear Accident* \Yu.M. Volkov, S.T. Leskin, Yu.D. Baranaev, A.I. Voropaev, M.F. Vorotyntsev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 5 pages, 4 illustration. – References, 5 titles.

The article describes an approach for the development of software for fast forecasting of nuclear accident consequences. The system combines the number of previous IPPE developments and models of air transfer of radioactivity. Also, described the method of giving more precise definitions of source of radioactive release using the registrations of automated monitoring system and using the measurements of radioactive conditions exploration. The system integrated with geoinformational system MapInfo using digital maps of territory.

### УДК 621.039.53:544.182

*Comparative Study of Equilibrium Configurations of Lennard–Jones Cluster Systems* \F.I. Karmanov, D.A. Reznichenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 8 pages, 5 illustrations. – References, 9 titles.

Realization of new multiparameter minimization algorithm based on Monte Carlo Method is considered and its efficiency in comparison with widely used methods of annealing and genetic search is analyzed.

### УДК 504.45:546.42

*Radioecological Model of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  Transfer in the River System «Iset–Tobol–Irtysh»* \A.I. Kryshev, A.V. Nosov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 10 pages, 7 tables. – References, 18 titles.

The complex radioecological model has been developed to describe the radionuclide transfer in the river system «Iset–Tobol–Irtysh». The model consists of two interrelated compartments: evaluation of the radionuclide migration in abiotic components of river (water, bottom sediments) and calculation of the radionuclide bioaccumulation in different ecological groups of fish. Using the model the activity concentrations of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in water, bottom sediments and fish (ide, pike) from the Iset, Tobol and Irtysh Rivers have been evaluated. Calculations have been performed for the current level of the radionuclide release from Tcha to Iset River.

### УДК 504.45:546.79

*Up-to-date Content of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and Tritium in Water of the River System Tobol–Irtysh (from the Iset River Mouth till Confluence with the Ob River)* \A.I. Nikitin, V.B. Chumichev, N.K. Valetova, I.Yu. Katrich, A.I. Kabanov, G.E. Dunaev, V.N. Shkuro, V.M. Rodin, A.N. Mironenko, E.V. Kireeva; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of High Schools. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2005. – 9 pages, 4 illustrations, 3 tables. – References, 11 titles.

Data on content of  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  and tritium in water of the Tobol–Irtysh part of the river system Tcha–Iset–Tobol–Irtysh–Ob (through which the radioactive wastes of the Mayak PA are transported) are presented and discussed. Data received in 2004 in frames of the ISTC Project № 2558 «Radioecological monitoring of the Tobol and Irtysh rivers. Study of biogenic transfer of radionuclides and radiation risk assessment for the population and environment».