

О.В. Яковлев¹, Ю.В. Прус²

¹ Вычислительный центр им. А.А. Дородницына РАН,

² Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: ntp-tsb@mail.ru)

БЕЗОПАСНОСТЬ КОСМИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Проведён анализ аварийных ситуаций с космическими аппаратами, оснащёнными ядерными источниками энергии. Разработана вычислительная программа для моделирования аварийного спуска с орбиты космического аппарата с ядерным источником энергии на борту.

Ключевые слова: безопасность, риск, космические аппараты, ядерные энергетические установки.

O.V. Yakovlev, Yu.V. Prus

SAFETY OF SPACE NUCLEAR POWER

Analysis of emergencies connected with spacecrafts equipped with nuclear power systems is carried out. The software has been developed for modeling the uncontrollable orbit ejection of spacecraft with on-board nuclear power system.

Key words: safety, risk, spacecrafts, nuclear power systems.

Одним из важнейших направлений развития базовых космических технологий являются работы по созданию перспективных ядерных электроэнергетических и двигательных установок [1, 2].

Работы по внедрению ядерной энергетики в космос в нашей стране в настоящее время ведутся в соответствии с "Концепцией развития космической ядерной энергетики в России", принятой Правительством РФ в постановлении от 02.02.98 № 144. В ней предусматривается создание научно-технического задела, обеспечивающего возможность разработки **ядерных энергетических установок (ЯЭУ) для космических аппаратов (КА)** нового поколения.

Многолетний опыт эксплуатации КА с ЯЭУ показал, что эти КА являются критически важными объектами. Однако в ходе их эксплуатации возможны аварии, развитие которых может привести к возникновению **чрезвычайных ситуаций (ЧС)**. Перечни запусков КА с ЯЭУ СССР и США [4, 5, 6,] представлены в табл. 1 и 2.

Анализ использования КА с ЯЭУ для решения научных, народно-хозяйственных, экспериментальных и военно-прикладных задач показал, что из общего количества запущенных КА с ЯЭУ у нас в стране и за рубежом примерно 15-20 % КА создавали угрозу возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС). Возможный ущерб при авариях КА с ЯЭУ варьируется в очень широких пределах. Так, по разным источникам, ущерб при разрушении КА "Космос-954" над безлюдной областью тундры на севере Канады был оценен правительством Канады на сумму 12 млн долларов. Соответственно, радиоактивное загрязнение местности в густонаселённой зоне вызовет значительно больший ущерб.

**Космические аппараты с ядерными источниками энергии на борту,
запущенные США**

Дата запуска	Космический корабль	Источник энергии	Статус/время жизни
29 июня 1961 г.	Транзит 4А	РТГ	
15 ноября 1961 г.	Транзит 4Б	РТГ	Недействующий
28 сентября 1963 г.	Транзит-5БН-1	РТГ	9 месяцев
5 декабря 1963 г.	Транзит-5БН-2	РТГ	Недействующий
21 апреля 1964 г.	Транзит-5БН-3	РТГ	Аварийный запуск
3 апреля 1965 г.	Снепшот	реактор	43 дня
18 мая 1968 г.	Нимбус-Б-1	РТГ	Аварийный запуск
14 апреля 1969 г.	Нимбус III	РТГ	Недействующий
14 ноября 1969 г.	Апполо 12	РТГ	
11 апреля 1970 г.	Апполо 13	РТГ	Аварийный запуск
31 января 1971 г.	Апполо 14	РТГ	
26 июля 1971 г.	Апполо 15	РТГ	
2 марта 1972 г.	Пионер 10	РТГ	
16 апреля 1972 г.	Апполо 16	РТГ	
2 сентября 1972 г.	Транзит-01-IX	РТГ	РИГ действует
7 декабря 1972 г.	Апполо 17	РТГ	
5 апреля 1973 г.	Пионер 11	РТГ	
20 августа 1975 г.	Викинг 1	РТГ	
9 сентября 1975 г.	Викинг 2	РТГ	
14 марта 1976 г.	LES 8	РТГ	РИГ действует
14 марта 1976 г.	LES 9	РТГ	РИГ действует
20 августа 1977 г.	Вояджер 1	РТГ	
5 сентября 1977 г.	Вояджер 2	РТГ	

РТГ – радиоизотопный термоэлектрический генератор;

РИГ – радиоизотопный генератор

Приведем краткий перечень основных аварий с ядерными установками, установленными на борту КА.

21 апреля 1964 г. при неудачной попытке запуска американского навигационного спутника "Транзит-5В" с ядерной энергетической установкой SNAP-9A на борту находившийся в ней плутоний-238 рассеялся в земной атмосфере.

18 мая 1968 г. в ходе выведения на орбиту метеорологического спутника "Нимбус-В" с ядерной энергетической установкой SNAP-19B2 на борту потерпела катастрофу американская ракетаноситель "ТорАджена". Благодаря прочности конструкции аппарата он не разрушился. Позднее он был найден и поднят на борт американского корабля. Радиоактивного заражения мирового океана не произошло.

25 апреля 1973 г. вследствие выхода из строя двигательной установки запуск советского спутника радиолокационной разведки с ядерной энергетической установкой на борту завершился неудачей. Аппарат не был выведен на расчётную орбиту и упал в Тихий океан.

Отечественные космические аппараты с ядерными источниками энергии

Дата запуска	Спутник	Источник энергии	Средняя высота полета (км)	Продолжительность работы
3 сентября 1965 г.	Космос 84	РИГ		
18 сентября 1965 г.	Космос 90	РИГ		
27 декабря 1967 г.	Космос 198	реактор	320	1 день
22 марта 1968 г.	Космос 209	реактор	305	1 день
25 января 1969 г.	Неудачный запуск			
23 сентября 1969 г.	Космос 300	РИГ	аварийное возвращение на землю	
22 октября 1969 г.	Космос 305	РИГ	аварийное возвращение на землю	
3 октября 1970 г.	Космос 367	реактор	370	1 день
1 апреля 1971 г.	Космос 402	реактор	390	1 день
25 декабря 1971 г.	Космос 469	реактор	380	9 дней
21 августа 1972 г.	Космос 516	реактор	375	32 дня
25 апреля 1973 г.	Неудачный запуск			
27 декабря 1973 г.	Космос 626	реактор	345	45 дней
15 мая 1974 г.	Космос 651	реактор	320	71 день
17 мая 1974 г.	Космос 654	реактор	365	74 дня
2 апреля 1975 г.	Космос 723	реактор	330	43 дня
7 апреля 1975 г.	Космос 724	реактор	300	65 дней
12 декабря 1975 г.	Космос 785	реактор	355	1 день
17 октября 1976 г.	Космос 860	реактор	360	24 дня
21 октября 1975 г.	Космос 861	реактор	360	60 дней
16 сентября 1977 г.	Космос 952	реактор	350	21 день
24 января 1978 г.	Космос 954	реактор	аварийное возвращение на землю, приблизительно 43 дня	
29 апреля 1980 г.	Космос 1176	реактор	320	134 дня
5 марта 1981 г.	Космос 1249	реактор	340	105 дней
21 апреля 1981 г.	Космос 1266	реактор	330	8 дней
24 августа 1981 г.	Космос 1299	реактор	345	12 дней
14 мая 1982 г.	Космос 1365	реактор	330	135 дней
1 июня 1982 г.	Космос 1372	реактор	345	70 дней
30 августа 1982 г.	Космос 1402	реактор	аварийное возвращение на землю	
2 октября 1982 г.	Космос 1412	реактор	345	39 дней
29 июня 1984 г.	Космос 1579	реактор	345	90 дней
31 октября 1984 г.	Космос 1607	реактор	350	93 дня
1 августа 1985 г.	Космос 1870	реактор	350	83 дня
23 августа 1985 г.	Космос 1677	реактор	340	60 дней
21 марта 1986 г.	Космос 1736	реактор	350	32 дня
20 августа 1986 г.	Космос 1771	реактор	350	56 дней
1 февраля 1987 г.	Космос 1818	реактор	300	около 6 месяцев
18 июня 1987 г.	Космос 1860	реактор	350	40 дней
10 июля 1987 г.	Космос 1867	реактор	300	около 1 года
12 декабря 1987 г.	Космос 1900	реактор	320	около 124 дней
14 марта 1988 г.	Космос 1932	реактор	365	66 дней

12 декабря 1975 г. сразу после выхода на орбиту вышла из строя система ориентации советского спутника радиолокационной разведки "Космос-785" с ядерной энергетической установкой на борту. Активная зона реактора была успешно отделена и переведена на орбиту захоронения, где и находится в настоящее время.

24 января 1978 г. в северо-западных районах Канады упал советский спутник радиолокационной разведки "Космос-954" с ядерной энергетической установкой на борту. При прохождении плотных слоев земной атмосферы произошло разрушение спутника и поверхности Земли достигли лишь некоторые его фрагменты. Произошло радиоактивное загрязнение поверхности.

28 апреля 1981 г. на советском спутнике радиолокационной разведки "Космос-1266" с ядерной энергетической установкой на борту зафиксирован выход из строя бортового оборудования. Активная зона реактора была успешно отделена и переведена на орбиту захоронения, где и находится в настоящее время.

7 февраля 1983 г. в пустынных районах Южной Атлантики упал советский спутник радиолокационной разведки "Космос-1402" с ядерной энергетической установкой на борту. Конструктивные доработки после предыдущей аварии позволили отделить активную зону от термостойкого корпуса реактора и предотвратить компактное падение обломков.

В апреле 1988 г. вышел из-под контроля советский спутник радиолокационной разведки "Космос-1900" с ядерной энергетической установкой на борту. Сработала аварийная защитная система и активная зона реактора была успешно отделена и переведена на орбиту захоронения.

После ряда неудачных запусков данное направление в космонавтике было приостановлено, поскольку запуск таких аппаратов создаёт угрозу возникновения ЧС.

В качестве первого шага для моделирования обстановки при аварийном спуске с орбиты космического аппарата с ядерной энергетической установкой разработан программный комплекс для оценки риска радиоактивного загрязнения местности. Программный комплекс построен по блочно-модульному принципу. Основными компонентами программного комплекса являются:

- **баллистический блок (ББ)**;
- **блок расчёта нуклидного состава (БРНС)** ядерного топлива на момент разрушения ядерной энергетической установки;
- **блок моделирования разрушения КА** в верхних слоях атмосферы (**БРКА**);
- **блок расчёта параметров гравитационного оседания частиц (БРГО)**;
- **блок расчёта сноса частиц** воздушными потоками и струйными течениями вне приземного слоя атмосферы (**БРСЧ**);
- **блок расчёта переноса частиц** в приземном слое атмосферы (**БРПЧ**);
- **блок оценки радиоактивного загрязнения местности (БРЗМ)**.

Структура программного комплекса приведена на рис. 1 и отражает функциональные связи, определенные в соответствии с концепцией построения системы предупреждения и ликвидации ЧС космического характера [6].

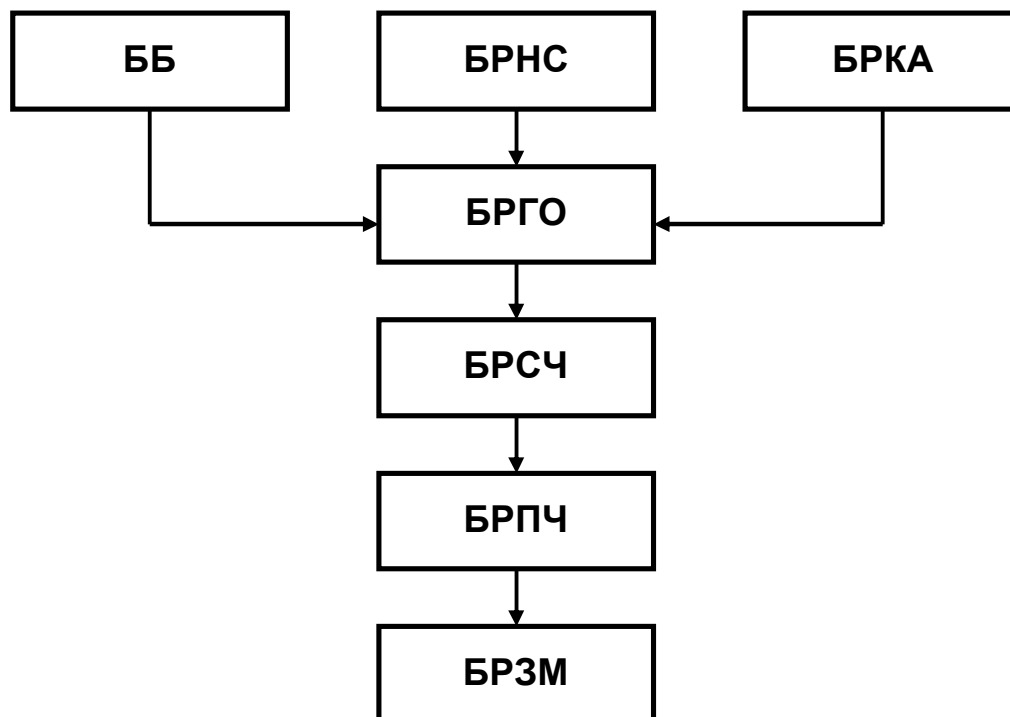


Рис. 1. Структура программного комплекса

Программный комплекс изначально разрабатывался для информационной поддержки принятия решений по оценке обстановки в чрезвычайной ситуации, вызванной неуправляемым спуском с орбиты КА с ядерной энергетической установкой. Блочнo-модульный принцип построения программного комплекса позволяет проводить моделирование обстановки для решения широкого круга задач, среди которых можно выделить следующие:

- исследовательские задачи;
- прикладные задачи прогнозирования обстановки в чрезвычайных ситуациях;
- учебные задачи.

В каждой из выделенных групп задач действуют определенные допущения и ограничения.

В качестве примера рассмотрен простейший вариант оценки обстановки в учебных целях. Оценка обстановки в данном случае проводится с целью отработки действий оперативных дежурных смен центров управления в кризисных ситуациях, направленных на выработку решений по предупреждению и ликвидации рассматриваемой чрезвычайной ситуации. Специфика решаемой задачи состоит в том, что в условиях ограниченного времени на сбор исходных данных из зоны возможной ЧС, большая часть исходных данных для проведения расчётов вводится в ЭВМ из базы данных, содержащей справочную информацию, полученную из различных источников, в том числе и на основе ранее проведенных тренировок. Соответственно, для учебных целей состав программного комплекса сокращен до отдельной прикладной программы, устанавливаемой на *автоматизированном рабочем месте (АРМ)* оценки обстановки в ЧС, вызванной неуправляемым спуском с орбиты КА с ядерной энергетической установкой на борту.

Вводимые оператором данные для работы прикладной программы делятся на данные справочного характера и данные, задаваемые пользователем.

Справочные данные включают в себя:

r_0 ($\text{кг}/\text{м}^3$) – плотность ядерного вещества;

$r_0(j)$ ($\text{кг}/\text{м}^3$) – распределение плотности воздуха по слоям атмосферы;

c – коэффициент лобового сопротивления частицы;

$w(j) = w_1(j), w_2(j)$, ($\text{км}/\text{с}$) – распределение скорости ветра по слоям атмосферы;

$w_1(j)$ – зональная составляющая скорости ветра $w(j)$;

$w_2(j)$ – меридиональная составляющая скорости ветра $w(j)$.

Вводимые пользователем данные:

M (кг) – масса радиоактивного вещества на космическом аппарате;

L (км) – протяженность зоны разрушения космического аппарата.

Программа предусматривает выбор пользователем одного из четырёх вариантов разрушения космического аппарата:

а) преобладают частицы малого размера (0-100 мкм);

б) преобладают частицы среднего размера (100-400 мкм);

в) преобладают частицы крупного размера (400-700 мкм);

г) преобладают сверхкрупные частицы (700-1000 мкм).

Учитываются также географическая широта местности и время года.

Алгоритм расчёта радиоактивного загрязнения местности в результате неконтролируемого входа в атмосферу Земли космического аппарата с ядерной энергетической установкой на борту в обобщенном виде может быть представлен в виде пошаговой процедуры следующим образом:

Шаг 1. Ввод исходных данных для расчёта.

Шаг 2. Приняв гипотезу о логарифмически нормальном распределении размеров (диаметров) радиоактивных частиц, выполняется моделирование размеров частиц путем генерирования последовательности чисел, распределенных по логнормальному закону в диапазоне 1-1000 мкм .

Шаг 3. Определяется количество мелких (N_1), средних (N_2), крупных (N_3) и сверхкрупных (N_4) частиц.

Шаг 4. С учётом плотности частиц определяется массовое содержание ($M_1 \dots M_4$) частиц для указанной размерности ($N_1 \dots N_4$) и их вклад в общую массу M радиоактивного вещества ЯЭУ.

Шаг 5. Для каждой группы частиц (малых, средних, крупных и сверхкрупных) рассчитывается время оседания T , а также времена $t(j)$ прохождения частиц в каждом j -м слое атмосферы. Расчёты проводятся по моделям гравитационного оседания частиц, что согласуется с основными положениями, принятыми в [9].

Шаг 6. Учитывая распределение скорости ветра по высоте, производится расчёт зонального и меридионального сноса $\Delta x(j)$, $\Delta y(j)$ при прохождении каждой частицы j -го слоя атмосферы, а также итоговый зональный и меридиональный снос частиц ветровыми потоками за полное время оседания T .

Шаг 7. Производится расчёт площади радиоактивного загрязнения $S_1 \dots S_4$ частицами каждой группы.

Шаг 8. Определяются уровни радиоактивного загрязнения на площадях $S_1 \dots S_4$:

$$\mu_1 = M_1/S_1, \quad \mu_2 = M_2/S_2, \quad \mu_3 = M_3/S_3, \quad \mu_4 = M_4/S_4.$$

Шаг 9. Вывод результатов расчётов:

- площади радиоактивного загрязнения местности S_1, S_2, S_3, S_4 частицами каждой группы;

- уровни радиоактивного загрязнения местности $\mu_1 = M_1/S_1, \mu_2 = M_2/S_2, \mu_3 = M_3/S_3, \mu_4 = M_4/S_4$ для каждой площади.

Описанный выше алгоритм реализован в виде программного продукта на языке C++. Программа работает в интерактивном режиме и снабжена вспомогательными меню для выбора элементов при вводе данных, необходимые комментарии расположены на рабочих панелях.

Литература

1. **Андреев П.В., Васильковский В.А.** Космическая ядерная энергетика: прошлое, настоящее, будущее // АтомПРЕССА, № 15, 2007.

2. **Куландин А.А., Тимашев С.В., Зайцев И.В.** Энергетические системы космических аппаратов. М.: Наука, 1994.

3. **Международное право**, № 3, 1993.

5. **Железняков А.Б.** Ядерное созвездие: история создания и эксплуатации отечественных космических аппаратов с ядерными энергетическими установками // Атомная стратегия XXI, сентябрь 2004.

4. **Aftergood S.** Background on Space Nuclear Power // Science & Global Security, № 1-2, Vol. 1, 1989. PP 93-107.

5. **Space Reactor Arms Control (Overview)** / Joel R. Primack et al. // Science and Global Security, № 1-2, Vol. 1, 1989. PP. 59-82.

6. **Ширшов В.Е.** Предложения в проект концепции создания единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера // Двойные технологии, 2000, № 3.

7. **Карасев П.А.** Ядерные энергетические установки в космосе // Атомная стратегия, № 30, июнь 2007.

8. **Яковлев О.В., Запорожец С.А.** Анализ риска возникновения чрезвычайных ситуаций при эксплуатации космических аппаратов с ядерными энергетическими источниками на борту // Проблемы анализа риска, № 1, т. 5, 2008.

9. **Павлов В.В.** Радиоактивные выпадения при разрушении космических ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 1988.