

УДК 621.039.58

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА РОСТЕХНАДЗОРА

Арбаев Г. Э. (gost.e-ecolog.ru Кавун О. Ю., д. т. н. (gost.e-ecolog.ru
Курбонмамадов А. Ш. (gost.e-ecolog.ru),
Хренников Н. Н., к. ф.-м. н. (gost.e-ecolog.ru)
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

В данной статье представлено краткое описание методики экспресс-расчета распределения продуктов деления в условиях тяжелых аварий на АЭС с реакторными установками типа ВВЭР для экспертов группы оценки и прогнозирования технологического состояния объектов использования атомной энергии Информационно-аналитического центра (ИАЦ) Ростехнадзора.

► ***Ключевые слова:*** *методика, ИАЦ Ростехнадзора, тяжелые аварии, продукты деления, ВВЭР.*
DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.001

THE METHODOLOGY FOR FAST ESTIMATION OF FISSION PRODUCTS DISTRIBUTION IN CASE OF SEVERE ACCIDENTS FOR INFORMATIONAL AND ANALITYCAL CENTER OF ROSTECHNADZOR

Arbaev G. E., Kavun O. Yu., Ph. D.,
Kurbonmamadov A. Sh., Khrennikov N. N., Ph. D.
(SEC NRS)

This article provides a brief description of the methodology for fast estimation of fission products distribution in case of severe accidents at NPP's with VVER type reactors during the operation of the experts' group for assessing and forecasting the technological state of nuclear facilities from the Informational and Analitycal Center (IAC) of Rostechnadzor.

► ***Keywords:*** *methodology, IAC of Rostechnadzor, severe accidents, fission products, VVER.*
DOI: 10.26277/SECNRS.2019.94.4.001

gost.e-ecolog.ru
gost.e-ecolog.ru

Для повышения эффективности работы экспертов группы оценки и прогнозирования технологического состояния оборудования энергоблоков АЭС Информационно-аналитического центра (ИАЦ) Ростехнадзора в режиме чрезвычайной ситуации, в соответствии с Положением об ИАЦ Ростехнадзора, необходимо использование средств, позволяющих оценить текущее состояние АЭС в случае тяжелой аварии, дать прогноз ее дальнейшего развития, рассчитать распределение радионуклидов по помещениям АЭС, а также дать прогноз выхода радионуклидов в окружающую среду при известных характеристиках неплотности герметичного объема (ГО).

С целью своевременной оценки и прогнозирования технологического состояния оборудования АЭС в условиях режима чрезвычайной ситуации необходимо обеспечить высокую скорость расчета и приемлемую точность. Ввиду того, что использование полномасштабных программных средств (ПС) не представляется возможным из-за характерных времен расчета, был выбран подход, основывающийся на использовании предварительно полученных результатов расчетов аварийных режимов. С этой целью специалистами ФБУ «НТЦ ЯРБ» было разработано ПС «Памир», которое приставляет собой средство подготовки, обработки и многомерной интерполяции результатов расчетов тяжелых аварий, предварительно полученных при помощи ПС «ASTEC» [1] для АЭС с реакторными установками типа ВВЭР. Метод интерполяции, примененный в ПС «Памир», был разработан, верифицирован и используется уже на протяжении 30-ти лет для интерполяции библиотек нейтронно-физических сечений в рамках ПС «РАДУГА-ЭУ» [2].

Использование данного подхода предполагает формирование библиотеки распределения продуктов деления (ПД) по помещениям ГО на основании результатов расчетов перечня аварийных сценариев и последующее использование полученной библиотеки в ПС «Памир» для оперативного расчета распределения радионуклидов по помещениям ГО в случае аварии (или при проведении противоаварийной тренировки).

Предложенный подход обладает рядом преимуществ, поскольку не накладывает значительных ограничений на вычислительные мощности и на детализацию расчетной схемы, позволяя оперативно получать оценку распределения радионуклидов по помещениям, так как библиотека распределения радионуклидов по помещениям в условиях тяжелых аварий формируется предварительно.

Методику, разработанную на основе данного подхода, можно условно разделить на два этапа: предварительный этап (проведение необходимых предварительных расчетов и создание библиотек распределения радионуклидов по помещениям) и основной этап (использование полученных библиотек во время противоаварийной тренировки или в случае возможной аварии на АЭС). На рис. 1 показана принципиальная схема методики экспресс-расчета распределения ПД по помещениям ГО.

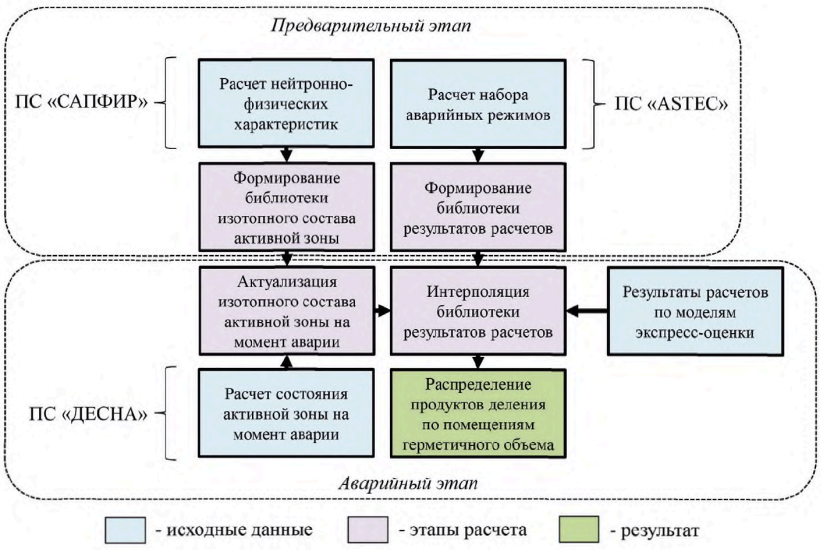

Рис. 1. Принципиальная схема методики экспресс-расчета распределения ПД по помещениям ГО

gost.e-ecolog.ru

С целью создания библиотеки изотопного состава активной зоны проводятся расчеты нуклидного состава активной зоны при помощи ПС «САПФИР-95» [3] параллельно с подготовкой библиотек нейтронно-физических сечений для моделей активных зон реакторных установок ВВЭР [4].

Для создания библиотеки распределения радионуклидов по помещениям ГО были проведены расчеты тяжелых аварий с выходом активности в помещения ГО, которые предполагают 3 основных типа отказов:

- обесточивание энергоблока;
- течи из первого контура в помещения ГО;
- течи из первого контура во второй контур.

Расчеты тяжелых аварий с плавлением топлива, исходные события для которых определяются путем комбинации вышеотмеченных отказов, осуществляются по ПС «ASTEC» [1]. Описание механизмов переноса массы вышедших за пределы контура циркуляции ПД и механизма высаждения аэрозолей ПД на поверхность представлены в [5, 6, 7]. По результатам расчетов на предварительном этапе формируется библиотека распределения радионуклидов по помещениям АЭС с ВВЭР в условиях тяжелых аварий.

В рамках основного этапа методики выполняется трехмерный нейтронно-физический расчет активной зоны с целью уточнения ее изотопного состава на момент аварии. Данный расчет может быть выполнен по моделям активных зон на базе ПС «ДЕСНА» [4].

Параллельно с этим необходимо проведение расчета аварийного энергоблока до момента начала деградации активной зоны при помощи моделей для экспресс-оценки состояния технологического оборудования [8]. Расчет по указанным моделям позволяет оценить время до начала деградации активной зоны и параметры аварийного энергоблока. На основании полученных результатов определяется сценарий развития аварии, и при помощи ПС «Памир» проводится расчет распределения радионуклидов по оборудованию и помещениям АЭС, а также определяются времена наступления характерных для данной тяжелой аварии событий, таких как: начало разрушения оболочек твэлов, образование расплава, разрушение корпуса реактора и т. д.

Также в ходе основного этапа проводится расчет выхода радионуклидов за пределы АЭС. Для проведения расчетов необходимы данные по распределению радионуклидов в помещениях АЭС, теплогидравлические параметры в указанных помещениях (такие как давление и температура), а также детерминистически определяемые параметры течи из ГО (диаметр, место расположения, время образования и т. д.). Параметры под защитной оболочкой и параметры течи определяются на предыдущем этапе по моделям для экспресс-оценки. Расчет выхода ПД выполняется по ПС «ТРР» [9].

В ходе создания комплекса программ «Памир» также был разработан модуль для упаковки и обработки данных, который позволяет преобразовать результаты предварительных расчетов по ПС «ASTEC» в удобный для дальнейшего использования вид. На рис. 2 показан порядок формирования библиотеки результатов расчетов. Она состоит из набора файлов прямого доступа, записью в которых является зависимость массы определенного ПД по всем независимым переменным, таким как диаметр течи из первого контура в ГО, из первого контура во второй и время с момента срабатывания аварийной защиты до момента образования течи.

Метод интерполяции, примененный в данной работе, состоит из следующих этапов:

- поиск диапазона интерполяции многомерного массива;
- вычисление приращения по абсциссам;
- вычисление интерполяционных коэффициентов;
- Процесс вычисления искомой величины.

Номенклатура нуклидов, использующихся в разработанной модели, включает в себя более 730 радионуклидов. При этом в рамках применения ПС «Памир» отсутствуют принципиальные различия в расчете распределения ПД разной степени летучести.

Результатом использования комплекса ПС «Памир» является временная зависимость распределения массы выбранных ПД в заданном помещении.

Верификация методики проводилась путем сравнения расчетов по ПС «ASTEC» с результатами экспресс-расчета по комплексу ПС «Памир». На примере аварии с течью теплоносителя первого контура эквивалентным диаметром 350 мм в условиях полного обесточивания энергоблока производился сравнительный анализ характерных времен достижения максимумов, а также их величин. Величина течи для сравнения выбрана исходя из того, что авария с течью первого контура эквивалентным диаметром 350 мм с одновременным наложением полного обесточивания энергоблока не входит в перечень аварий, на основе которого была сформирована библиотека распределения радионуклидов по помещениям ГО.

gost.e-ecolog.ru

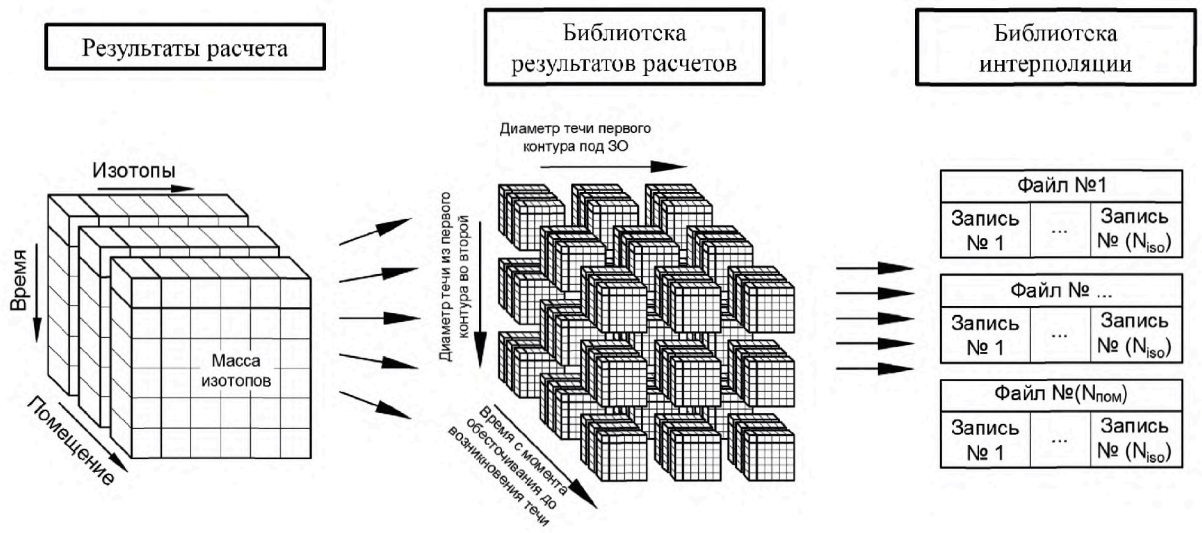

Рис. 2. Порядок формирования библиотеки результатов расчетов

В качестве результатов верификации на рис. 3 – 8 представлено сравнение массы ^{136}Cs, ^{131}I, ^{129}I в центральной части центрального зала (ЦЗ), а также массы ^{137}Cs в центральной, пристенной и верхней частях ЦЗ. Представленные изотопы имеют максимальные величины погрешности, полученные в ходе сравнения результатов расчетов ПС «Памир» с ПС «ASTEC». Пристенная часть ЦЗ, толщина которой составляет 2 м, представляет интерес для расчета в силу более выраженного процесса конденсации газоаэрозольной среды, что позволяет оценить концентрацию ПД на поверхности стен ЦЗ. На рис. 9 представлено сравнение суммарной активности ПД в ЦЗ.

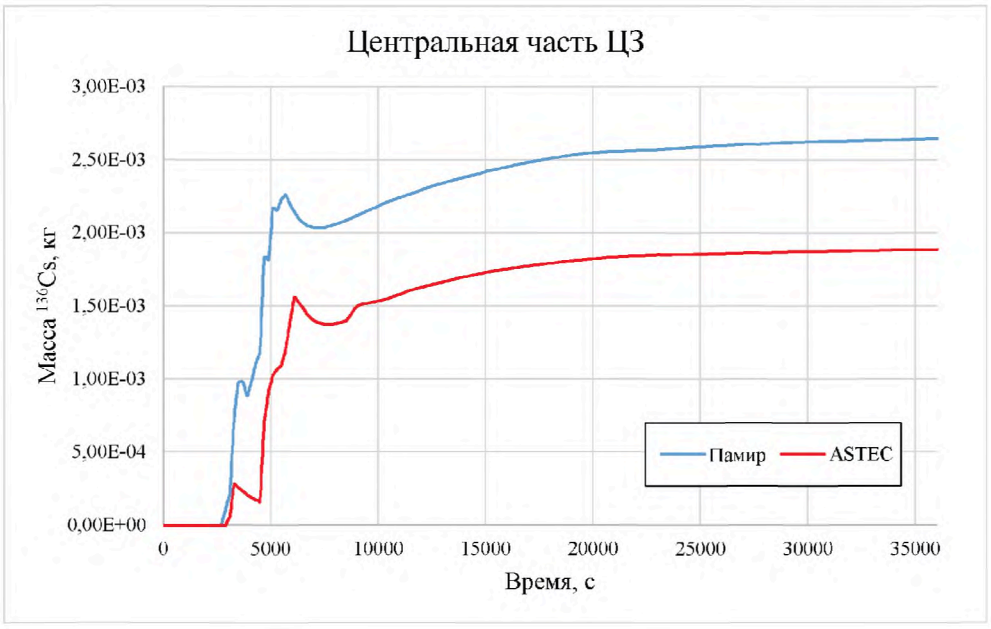

Рис. 3. Масса изотопа ^{136}Cs в центральной части ЦЗ

gost.e-ecolog.ru

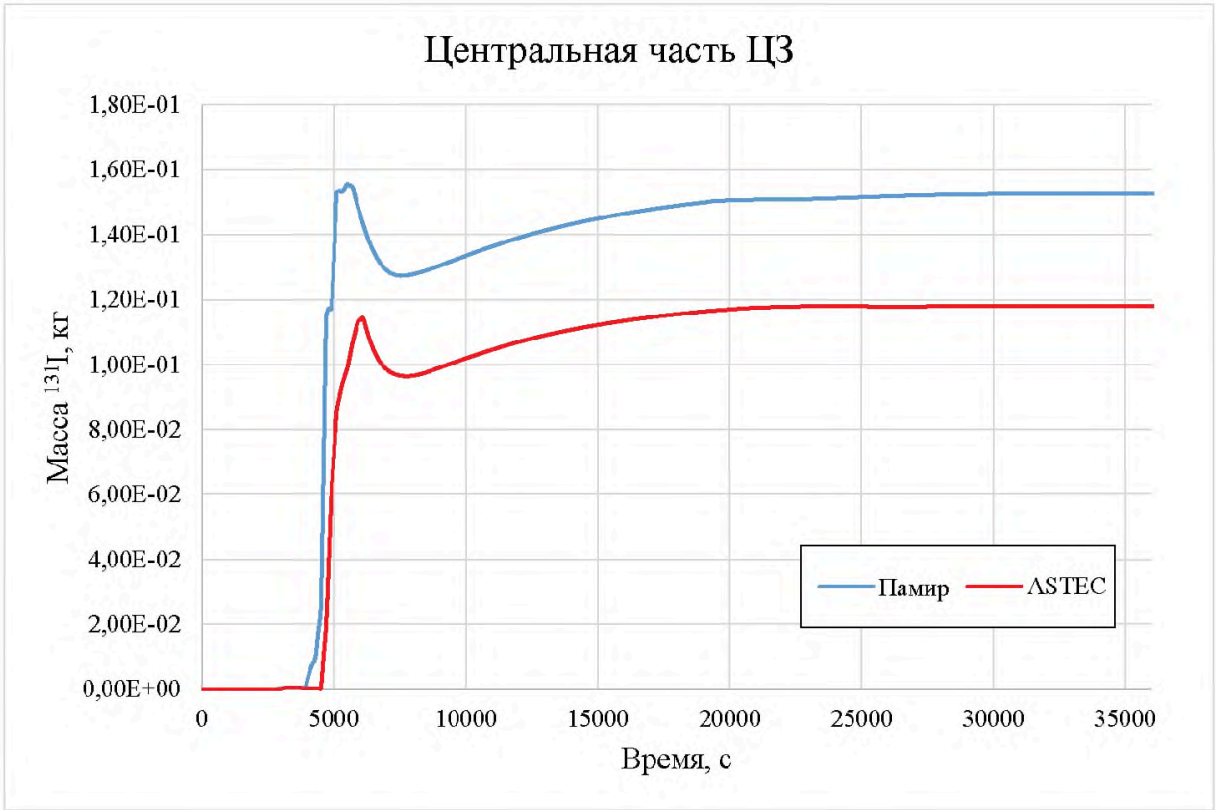

Рис. 4. Масса изотопа ^{131}I в центральной части ЦЗ

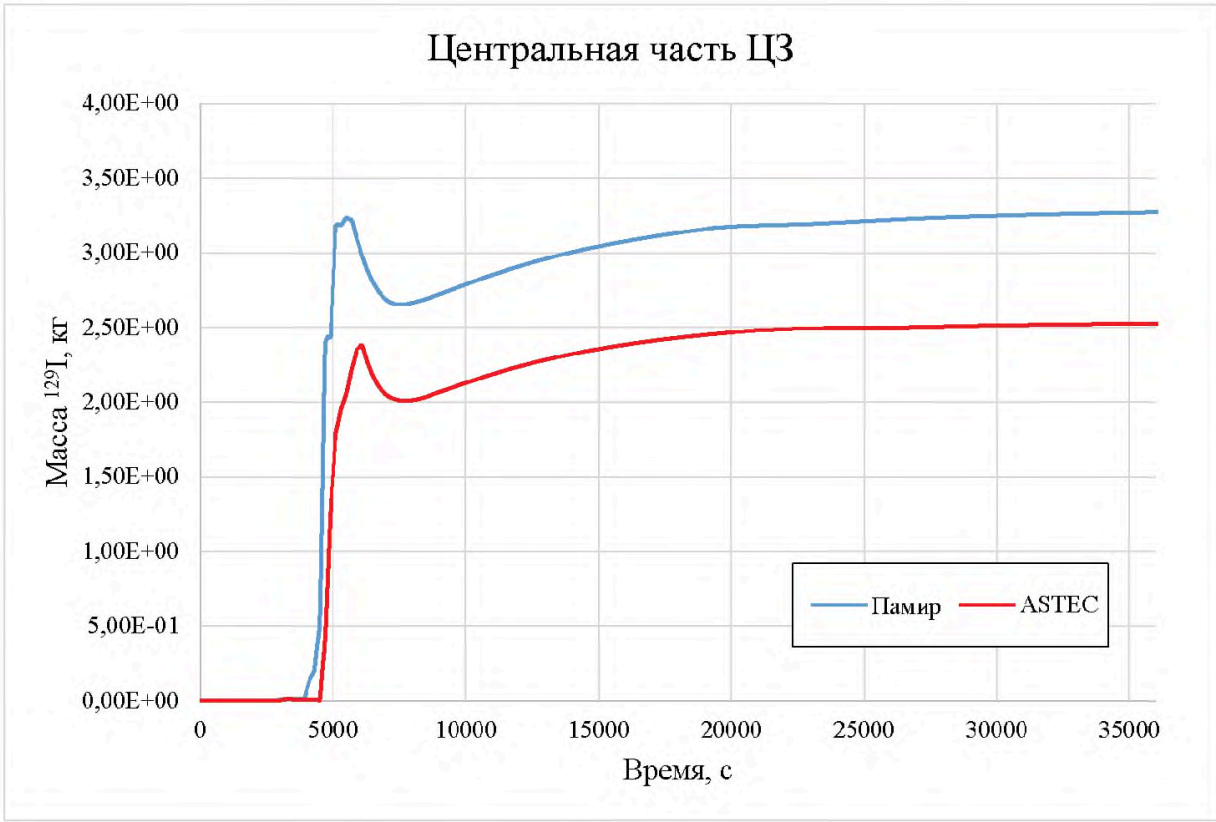

Рис. 5. Масса изотопа ^{129}I в центральной части ЦЗ

gost.e-ecolog.ru

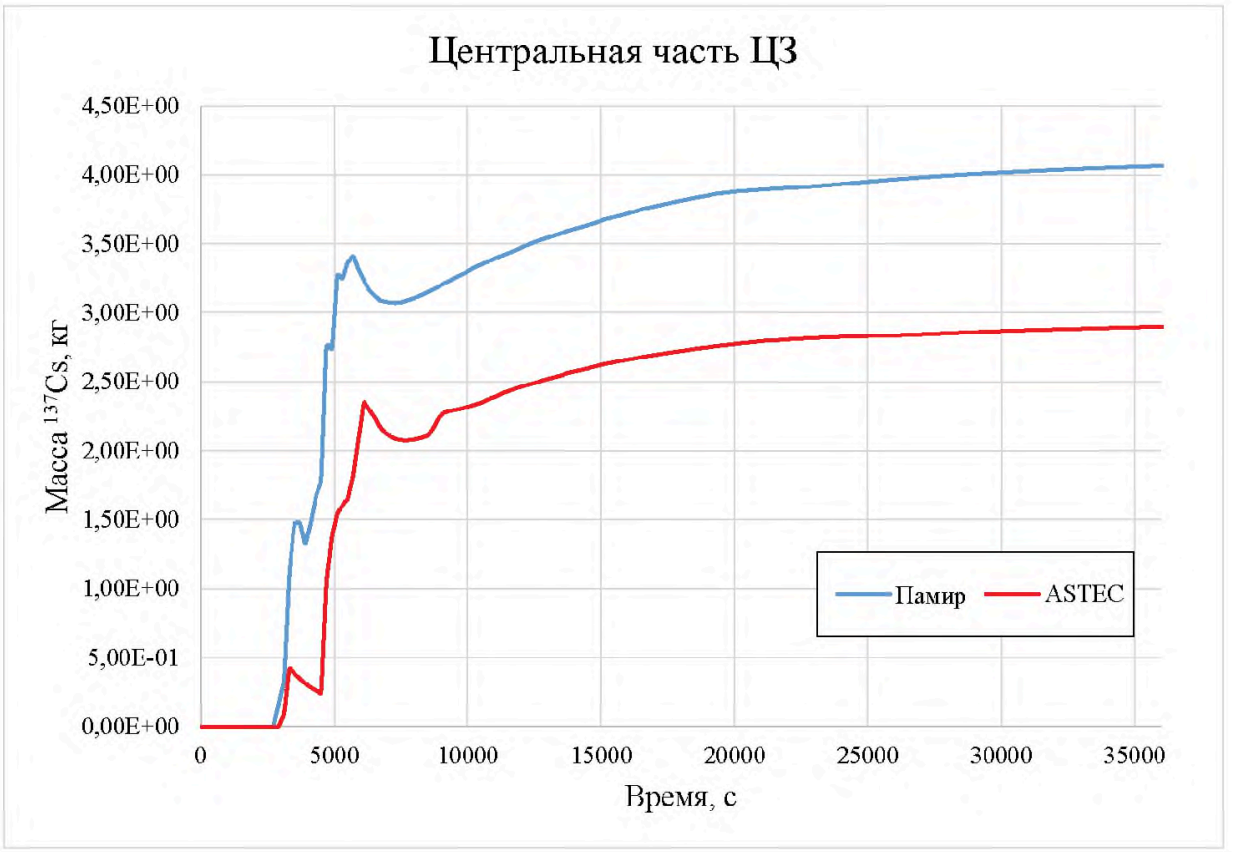

Рис. 6. Масса изотопа ^{137}Cs в центральной части ЦЗ

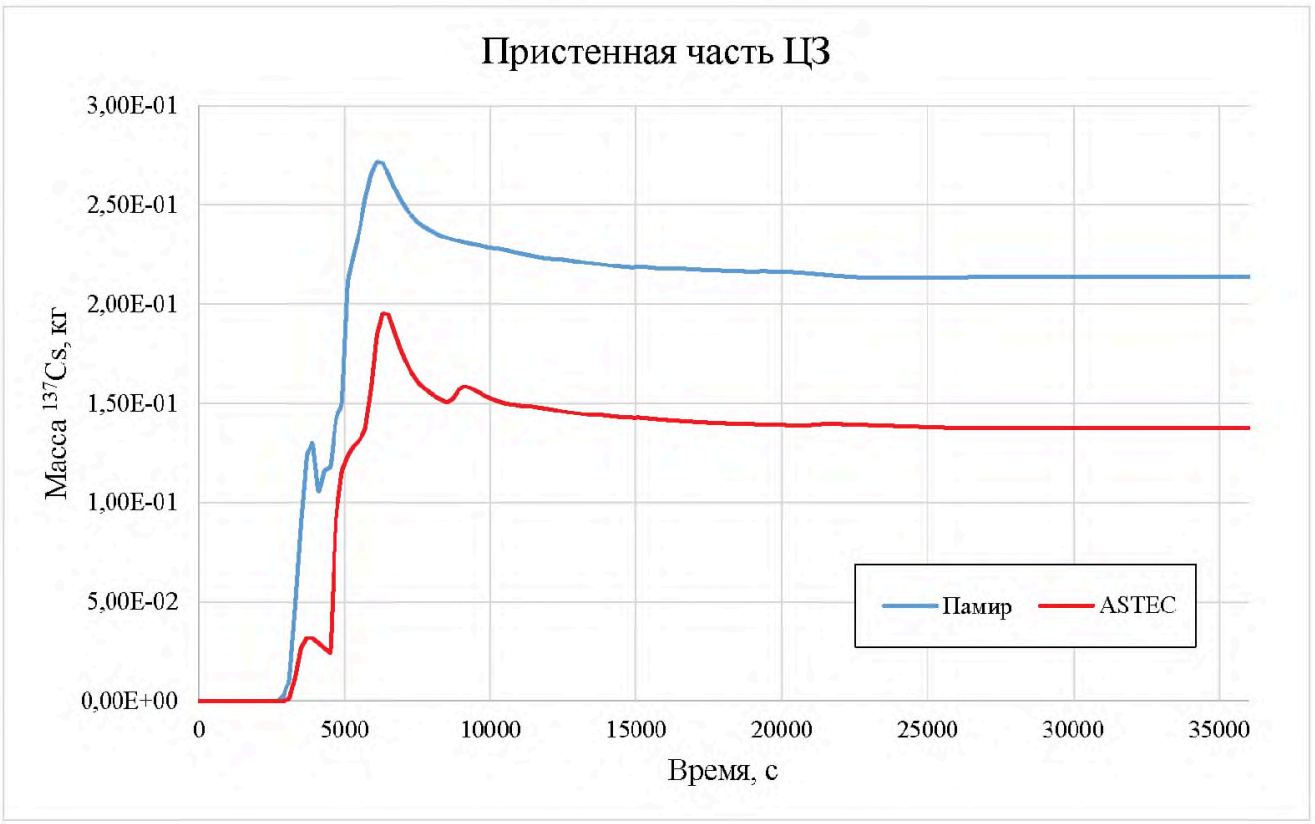

Рис. 7. Масса изотопа ^{137}Cs в пристенной части ЦЗ

gost.e-ecolog.ru

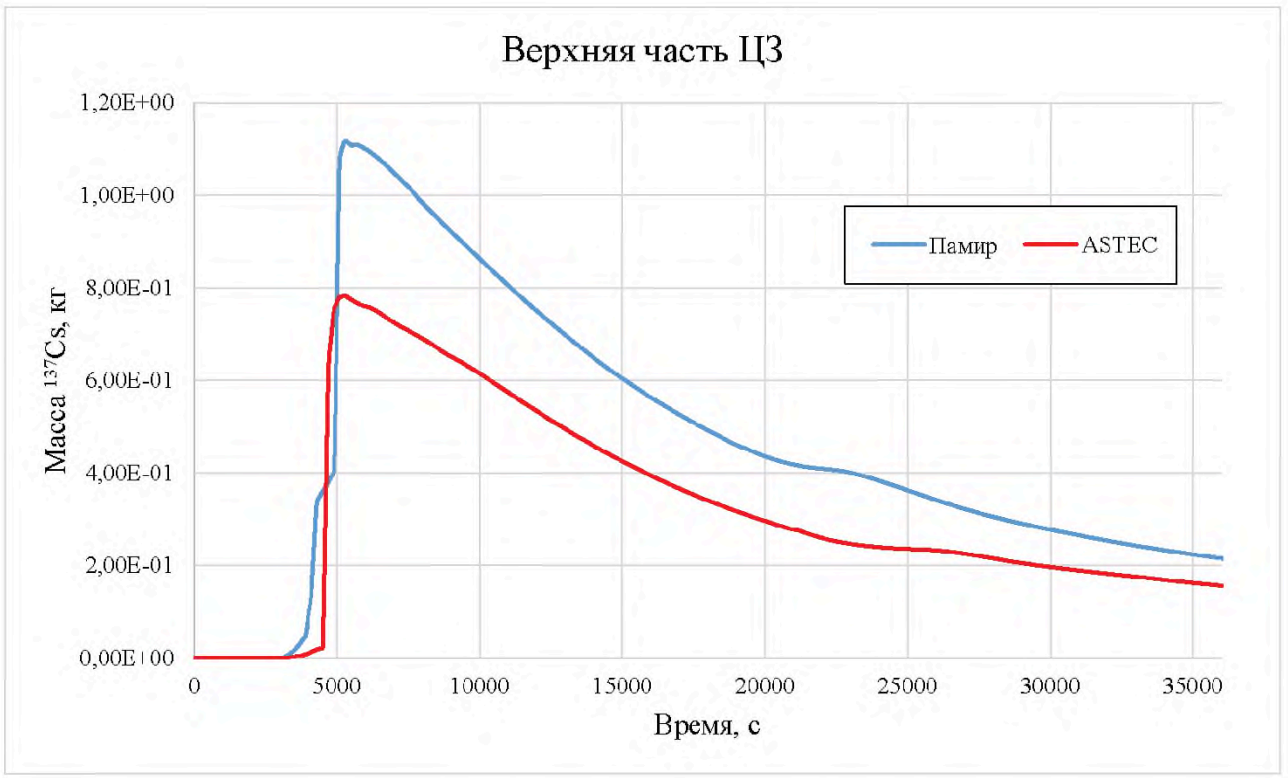

Рис. 8. Масса изотопа ^{137}Cs в верхней части ЦЗ

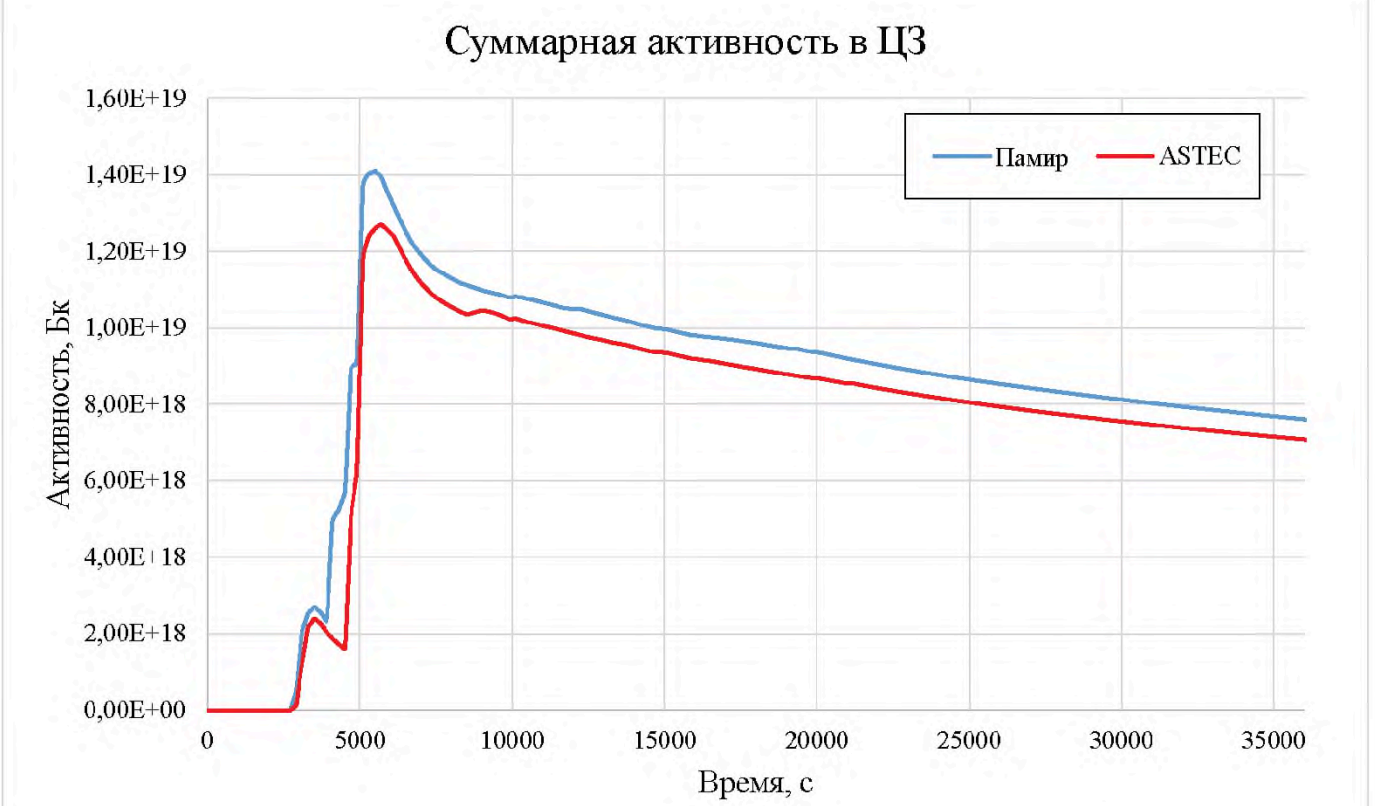

Рис. 9. Суммарная активность в ЦЗ

gost.e-ecolog.ru

Локальный максимум активности на промежутке от 5 000 с до 6 000 с вызван разрушением опорной плиты, попаданием расплава активной зоны в нижнюю камеру реактора, образованием большого количества пара и его взаимодействием с элементами активной зоны.

Наблюдаемое систематическое отклонение значения массы радионуклидов по ПС «Памир» объясняется недостаточной густотой шага сетки независимых переменных, который был применен для верификации ПС «Памир».

Погрешности определения характерных времен достижения максимумов концентраций ПД, а также их величин представлены в таблице.

Полученные результаты сопоставления расчетов распределения радионуклидов по помещениям по ПС «Памир» с прямым моделированием по ПС «ASTEC» говорят о возможности применения данной методики в качестве методики экспресс-оценки распределения радионуклидов по помещениям ГО с приемлемой точностью.

Заключение

Модели экспресс-оценки, созданные на базе ПС «Памир», позволяют дать прогноз распределения радионуклидов по помещениям АЭС, а также выхода радионуклидов в окружающую среду при известных характеристиках неплотности ГО с учетом актуальной номенклатуры ПД на момент начала аварии.

Разработанная методика экспресс-оценки распределения продуктов деления по помещениям ГО в случае тяжелой аварии продемонстрировала свою работоспособность и применяется в ИАЦ Ростехнадзора при противоаварийных тренировках.

Погрешности, полученные в результате верификации

Величина	Значение
Максимальная погрешность определения локальных экстремумов концентраций ПД	45 %
Максимальная погрешность определения времени наступления локальных экстремумов	7 %
Средняя погрешность расчета концентраций ПД по методике ПС «Памир»	40 %
Средняя погрешность расчета суммарной активности в ЦЗ	13 %

Список литературы

1. Chatelard P., Reinke N. Overview of the integral code ASTEC V2.0 revision 0 // IRSN. 2009. URL: https:// gost.e-ecolog.ru (дата обращения: 27.11.2019).
2. Кавун О. Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. 1999. Вып. 2. С. 17 – 39.
3. Аттестационный паспорт программного средства САПФИР-95 от 02.03.2000 № 116.
4. Кавун В. О., Кавун О. Ю., Адеев В. А. Разработка моделей активных зон реакторных установок типа ВВЭР-440 для целей поддержки Информационно-аналитического центра Ростехнадзора // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. трудов / Подольск, 2017.
5. Allelein H., Auvinen A., Ball J., Güntay S., Herranz L., Hidaka A., Jones A., Kissane M., Powers D., Weber G. State-of-the-art report on nuclear aerosols // NEA/CSNI/R(2009)5. 2009. URL: gost.e-ecolog.ru org/nsd/docs/2009/csni-r2009-5.pdf (дата обращения: 27.11.2019).
6. Lacoue-Negre M. Chimie de l'iode dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave – Etude de mélanges CsI/MoO3 sous vapeur d'eau // These pour obtenir le grade de Docteur. L'Université des Sciences et Technologies de Lille. 2010. URL: gost.e-ecolog.ru Theses-soutenues/DPAM/Documents/2010-these-lacoue-negre.pdf (дата обращения: 27.11.2019).
7. Bosland L., Cantrel L., Girault N., Clement B. Modeling of iodine radiochemistry in the ASTEC severe accident code: description and application to FPT-2 PHEBUS test // Nuclear Technology. 2010. Vol. 171. No. 1. P. 88 – 107. URL: gost.e-ecolog.ru accident_code_Description_and_application_to_FPT-2_PHEBUS_test_IODE (дата обращения: 27.11.2019).

gost.e-ecolog.ru

8. Пипченко Г. Р., Поликарпова А. М., Кавун О. Ю., Ланкин М. Ю., Зайцев С. И. Применение модели экспресс-оценки состояния критических функций безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР в ИАЦ Ростехнадзора // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС. 2015. № 35. С. 94 – 108.

9. Кавун О. Ю., Куно М. Я., Фейман В. Г. Программа «ТРР» для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей // Алгоритмы и программы для нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов «НЕЙТРОНИКА-97»: сб. трудов семинара МАЭ РФ / Обнинск, 1998. С. 111 – 118.

References

1. Chatelard P., Reinke N. Overview of the integral code ASTEC V2.0 revision 0 // IRSN. 2009. URL: https://
gost.e-ecolog.ru
_ASTEC.pdf (reference date: 27.11.2019).

2. Kavun O. Yu. Methodology for simulation of nuclear plant dynamics implemented in RADUGA-EU software // Science and engineering issues. Ser.: Physics of nuclear reactors. 1999. Issue 2. Pp. 17 – 39.

3. Certificate for 'SAPFIR-95' software No. 116 of 02.03.2000.

4. Kavun V. O., Kavun O. Yu., Avdeev V. A. Development of the VVER-440 reactor core models to support the Information and Analysis Center of Rostechnadzor // Safety assurance for the VVER NPPs: collected papers / Podolsk, 2017.

5. Allelein H., Auvinen A., Ball J., Güntay S., Herranz L., Hidaka A., Jones A., Kissane M., Powers D., Weber G. State-of-the-art report on nuclear aerosols // NEA/CSNI/R(2009)5. 2009. URL: gost.e-ecolog.ru
docs/2009/csni-r2009-5.pdf (reference date: 27.11.2019).

6. Lacoue-Negre M. Chimie de l'iode dans le circuit primaire d'un réacteur nucléaire en situation d'accident grave – Etude de mélanges CsI/MoO3 sous vapeur d'eau // These pour obtenir le grade de Docteur. L'Université des Sciences et Technologies de Lille. 2010. URL: gost.e-ecolog.ru
Theses/Theses-soutenues/DPAM/Documents/2010-these-lacoue-negre.pdf (reference date: 27.11.2019).

7. Bosland L., Cantrel L., Girault N., Clement B. Modeling of iodine radiochemistry in the ASTEC severe accident code: description and application to FPT-2 PHEBUS test // Nuclear Technology. 2010. Vol. 171. No. 1. P. 88 – 107. URL: gost.e-ecolog.ru
ASTEC_severe_accident_code_Description_and_application_to_FPT-2_PHEBUS_test_IODE (reference date: 27.11.2019).

8. Pipchenko G. R., Polikarpova A. M., Kavun O. Yu., Lankin M. Yu., Zaitsev S. I. Application of model for rapid assessment of critical safety functions status at the VVER NPPs at the Information and Analysis Center of Rostechnadzor // Science and engineering issues. Ser.: Safety assurance for nuclear power plants. 2015. No. 35. Pp. 94 – 108.

9. Kavun O. Yu., Kuno M. Ya., Feiman V. G. The 'TRR' code for thermal hydraulic analysis of complicated thermal hydraulic systems // Codes and algorithms for neutronic analysis of nuclear reactors 'NEITRONIKA -97': proceedings of the RF MAE workshop / Obninsk, 1998. Pp. 111 – 118.

gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru