

СЕКЦИЯ № 3 «РАСЧЕТЫ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ И РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ»

*А.В. Никитин, д.т.н. (АО «НИКИЭТ»), А.И. Попыкин, к.ф.-м.н.,
Р.А. Шевченко (ФБУ «НТЦ ЯРБ»)*

В федеральном законе «Об использовании атомной энергии» от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ установлено, что обеспечение безопасности при использовании атомной энергии – это защита отдельных лиц, населения и окружающей среды от радиационной опасности. При этом в федеральном законе «О радиационной безопасности населения» уточняется, что радиационная безопасность населения – это состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения.

Обоснование радиационной безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) опирается на расчеты, результаты которых должны однозначно показать, что безопасность человека и окружающей среды будет обеспечена при любых условиях эксплуатации ОИАЭ. ПС, используемые для проведения таких расчетов, являются предметом рассмотрения секцией № 3 «Расчеты радиационной защиты и радиационной безопасности».

Очевидная значимость ПС, предназначенных для обоснования радиационной безопасности, привела к началу работы секции № 3. Первое ПС было аттестовано в 1994 г. В то время секцию № 3 возглавлял Я.А. Бычков. Однако регулярная работа секции № 3 началась лишь в конце 90-х годов, когда секцию возглавил заместитель директора ИБРАЭ РАН, д.т.н. И. И. Линге. В 2011 г. пост председателя секции занял д.т.н. А. В. Никитин, который успешно руководит ею и по сей день.

Если рассмотреть тематику секции в отношении непосредственно ядерных энергетических установок, то область применения ПС, рассматриваемых на секции № 3, охватывает задачи от расчетов источников излучения (активности), формируемых в процессе деления ядер топлива, т.е. появление осколков деления, и до определения дозовых нагрузок. Такой широкий диапазон задач требует проведения верификации моделирования значительного количества явлений и процессов, которые выходят за рамки деятельности секции № 3, что в свою очередь требует постоянного взаимодействия секции № 3 с другими тематическими секциями экспертного Совета.

До настоящего времени экспертным Советом аттестовано 23 ПС, которые проходили экспертизу в секции № 3. При этом их можно разделить по назначению на три основные тематические группы:

- 1) моделирование переноса нейтронов и фотонов при расчетах радиационной защиты ОИАЭ;
- 2) проведение расчетов источников активности и распространения продуктов деления;
- 3) моделирование радиационных последствий аварий на ОИАЭ, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ, а также расчеты дозовых нагрузок, возникающих в результате этого.

1. ПС, обеспечивающие моделирование переноса нейтронов и фотонов

В последнее время экспертиза ПС, предназначенных для моделирования переноса нейтральных частиц (нейтронов и фотонов) в защитных композициях, проводится в секции № 1 «Нейтронно-физические расчеты» Совета. Тем не менее, в настоящее время еще действуют аттестационные паспорта ПС, моделирующих перенос нейтронов и гамма-квантов, экспертиза которых осуществлялась на секции № 3.

В табл. 1 перечислены аттестованные ПС, с помощью которых решаются уравнения переноса нейтронов и фотонов с учетом конструктивных особенностей конкретных ОИАЭ.

Верификация ПС «DORT» для расчета характеристик пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов в различных защитных композициях реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем выполнялась в АО «ОКБМ Африкантов». При этом использовалась специализированная библиотека констант, разработанная в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» А.В. Салаяевым. С помощью этого ПС можно проводить расчеты ослабления потока нейтронов в различных защитных композициях, оценку скорости активации и мощности дозы в конструкционных материалах. Необходимо отметить, что для других типов реакторов, включая ВВЭР, ПС с аналогичными возможностями пока не аттестованы.

ПС «MCNP4B» с библиотекой констант «DLC189/MCNPDAT» аттестовано для моделирования переноса нейтронов и фотонов при проведении проектных расчетов радиационной защиты и обосновании радиационной безопасности транспортных упаковочных комплектов конкретных конфигураций, в том числе железобетонных и свинцово-водных (верификация ПС для расчетов конфигураций с бетоном не проводилась). Данное ПС является одним из двух аттестованных ПС, позволяющих моделировать перенос гамма-квантов. Другое аналогичное ПС «BRAND-ГАММА» аттестовано для расчета плотности потока и мощности дозы фотонов при заданном пространственно-энергетическом распределении источников фотонов.

Несколько ПС аттестованы для решения уравнения переноса нейтронов с целью оценки плотности потока нейтронов на корпусе реактора и дальнейшего определения повреждающей дозы. В настоящее время эти ПС используются для определения ресурса корпусов реакторов ВВЭР. ПС «DOT3» «DORT» и «ANISN» с библиотеками констант BGL440 и BUGLE-96 аттестованы как единый комплекс для расчёта скорости накопления флюенса на корпусах реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Верификация проведена для расчетов плотности потока нейтронов с энергией выше 0,5 МэВ на внутренней и внешней поверхностях корпуса реактора и в его толще. Трёхмерное распределение плотности потока (скорости накопления флюенса) нейтронов на внутренней и внешней поверхностях и в толще корпуса

Секция № 3 «Расчеты радиационной защиты и безопасности»

реактора в ПС рассчитывается методом синтеза двумерных (радиально-азимутального и радиально-аксиального) и одномерного (радиального) распределений. Решение уравнения переноса осуществляется разностным S_n -методом. Верификацию ПС проводили НИЦ «Курчатовский институт» совместно с АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Таблица 1

Аттестованные ПС для моделирования переноса нейтронов и фотонов

Наименование ПС	Организация(и)-разработчик	Аттестационный паспорт
MCU-REA/2 с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 218 от 19.09.2006
DOT3, DORT и ANISN с библиотеками констант BGL440 и BUGLE-96»	Oak Ridge National Laboratory	№ 233 от 18.09.2005
DOT3, DORT и ANISN с библиотеками констант BGL1000 и BUGLE-96	Oak Ridge National Laboratory	№ 234 от 18.09.2005
MCNP4B с библиотекой констант DLC189/MCNPDAT	Los Alamos National Laboratory	№ 236 от 18.09.2007
BRAND-ГАММА	ЗАО «Альянс-Гамма» и ЗАО «Спецатомсервис»	№ 304 от 02.04.2012
DORT с библиотекой констант, основанной на ENDF/B- VI версия 8	Oak Ridge National Laboratory	№ 342 от 21.11.2013
TORT с библиотекой констант, основанной на ENDF/B-VI, версия 8	Oak Ridge National Laboratory	№ 343 от 18.09.2007
КАТРИН–2.5 ДЛЯ ВВЭР-440	ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	№ 356 от 17.04.2014
КАТРИН–2.5 ДЛЯ ВВЭР-1000	ИПМ им. М.В. Келдыша РАН	№ 357 от 17.04.2014
DOT-III, DORT, ANISN с библиотекой констант BGL1000 и BUGLE-96Т	Oak Ridge National Laboratory	№ 370 от 18.03.2015

ПС «MCU-REA/2» аттестовано вместе с библиотекой констант DLC/MCUDAT-2.2 для расчётов плотности потока нейтронов с энергией выше 0,5 МэВ во внутрикорпусном пространстве, на внутренней и внешней поверхностях и в материале корпусов водо-водяных реакторов при заданном источнике нейтронов деления в активной зоне (уравнение переноса решается методом Монте-Карло).

ПС «КАТРИН-2.5» вместе с пре- и постпроцессорами и библиотеками констант «BGL1000», «BGL1000_B7» и «V7-200N47G» аттестовано для расчета пространственно-энергетического распределения плотности потока нейтронов, скорости накопления флюенса нейтронов с $E > 0,1$ МэВ и $E > 0,5$ МэВ на внутрикорпусных устройствах и корпусе реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и

удельной скорости реакции ^{59}Co (n, γ) ^{60}Co в выгордке. В ПС реализовано численное решение многогруппового уравнения переноса нейтронов и фотонов методом дискретных ординат в трехмерной геометрии. При этом перенос фотонов не верифицирован.

2. ПС для определения источников активности и моделирования их распространения

Вторая группа ПС, которые рассматриваются на секции № 3, это ПС, предназначенные для проведения расчетов источников активности и распространения продуктов деления. Аттестованные в этой тематической области ПС перечислены в табл. 2.

Таблица 2

Аттестованные ПС для расчета источников активности, моделирования их распространения и доз

Наименование ПС	Организация(и)-разработчик	Аттестационный паспорт
FPR-INT-1.20	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 032 от 22.12.1994
RELWWER-2.0	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 119 от 02.03.2000
LEAK3	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 377 от 16.12.2015
РТОП-СА	ГНЦ РФ ТРИНИТИ	№ 258 от 17.03.2009
РАДИОНУКЛИД	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 281 от 09.12.2010
БЕТА-ГАММА-ПРОЕКТ	АО «СПБАЭП» и НИИ Физики СПбГУ	№ 133 от 02.11.2001
ЗАЩИТА-ПРОЕКТ	АО «СПБАЭП» и НИИ Физики СПбГУ	№ 219 от 21.02.2007

ПС «FPR-INT-1.20», предназначенное для проведения расчетов активности продуктов деления под оболочками герметичных и негерметичных твэлов, в теплоносителе первого контура, парогазовом компенсаторе давления, а также расчета скоростей уноса активности с организованными и неорганизованными протечками теплоносителя аттестовано в 1994 г. Дальнейшим развитием ПС «FPR-INT-1.20» стало ПС «RELWWER-2.0», которое также аттестовано для расчетов активности продуктов деления под оболочками герметичных и негерметичных твэлов в теплоносителе первого контура. В настоящее время в секции № 3 проводится экспертиза результатов верификации новой версии ПС – «RELWWER UNI».

ПС «LEAK3» аттестовано для расчета активности продуктов деления, выбрасываемых из системы локализации в окружающую среду при авариях с разгерметизацией первого контура. При этом для проведения расчетов используются результаты анализа теплофизических процессов в активной зоне и в системе локализации. Рассматриваются три формы для йодов: молекулярная,

аэрозольная и органическая. Все остальные радионуклиды (за исключением инертных радиоактивных газов) рассматриваются как аэрозоли.

ПС «РТОП-СА» предназначено для расчета активности продуктов деления ($^{131-135}\text{I}$, $^{133,135,135\text{m},137,138}\text{Xe}$ и $^{85\text{m},87,88}\text{Kr}$) в теплоносителе первого контура реакторов ВВЭР при номинальных и маневренных режимах работы на мощности. При этом ПС также обеспечивает расчет отношения активности ^{134}Cs и ^{137}Cs в топливе и под оболочкой твэлов. Стоит отметить, что в 2007 г. аттестовано ПС «РТОП-КГО» (аттестационный паспорт от 21.02.2007 № 221), которое близко по своему назначению к ПС «РТОП-СА». При этом ПС позволяет моделировать кинетику выноса активности радиоактивных продуктов деления (изотопы I, Cs, Xe, Kr, твердые частицы топлива, содержащие продукты деления) из «дефектных» твэлов при изменении давления в пенале системы обнаружения дефектных сборок (СОДС). Данное ПС также проходило экспертизу и на секции № 2 «Расчеты теплопередачи и гидродинамики, связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты, моделирование нестационарных и аварийных процессов».

Два ПС, разработанных в АО «АТОМПРОЕКТ», аттестованы для расчета источников бета- и гамма-излучения при проектировании радиационной защиты. ПС «БЕТА-ГАММА-ПРОЕКТ» аттестовано для расчетов накопления радионуклидов в технологических средах и оборудовании основных и вспомогательных контуров станции, в радиоактивных отходах станции (жидких, твердых, газообразных), а также расчетов объемных активностей радионуклидов в атмосфере. ПС «ЗАЩИТА-ПРОЕКТ» обеспечивает расчеты мощности дозы в местах размещения элементов основного оборудования реакторной установки вспомогательного оборудования и строительных конструкций; мощности дозы в зонах обслуживания персоналом оборудования реакторной установки, вспомогательного оборудования, включая транспортно-технологические операции и обращение с радиоактивными отходами. При проведении расчетов с помощью этого ПС применяются аналитические формулы для простой геометрии источников и для нерассеянного излучения с использованием факторов накопления.

Особое место в этой группе ПС занимает ПС «РАДИОНУКЛИД», которое обеспечивает определение нуклидного состава топлива и его радиационных характеристик в тепловыделяющих сборках ядерных реакторов в зависимости от выгорания топлива и времени его выдержки после окончания облучения. ПС позволяет проводить расчет источника для определения плотности потока γ -излучения, источника для определения плотности потока нейтронов за счет спонтанного деления и реакции (α, n) на кислороде топливной матрицы, изменения массовых и радиационных характеристик групп нуклидов, сгруппированных по определенным признакам. Стоит отметить, что аналогичное ПС «ТВС-РАД» (аттестационный паспорт от 09.12.2010 № 282) проходило экспертизу на секции № 1 «Нейтронно-физические расчеты» применительно к реакторам ВВЭР.

3. ПС для моделирования радиационных последствий аварий на ОИАЭ, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ

Первое ПС, предназначенное для моделирования радиационных последствий аварий на ОИАЭ, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ, аттестовано в 2000 г. (табл. 3). Разработанное в НИЦ «Курчатовский

институт» ПС «ДОЗА-М» обеспечивает расчет дозы внешнего облучения от радионуклидов, находящихся в облаке и на поверхности земли, и внутреннего облучения от радионуклидов, поступивших в организм с вдыхаемым воздухом (ингаляция) и при потреблении продуктов питания.

Таблица 3

Аттестованные ПС для моделирования радиационных последствий аварий на ОИАЭ, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ

Наименование ПС	Организация(и)-разработчик	Аттестационный паспорт
ДОЗА-М	НИЦ «Курчатовский институт»	№ 117 от 02.03.2000
«НОСТРАДАМУС»	ИБРАЭ РАН	№ 158.1 от 17.04.2014
«ДОЗА 3.0»	АО «АТОМПРОЕКТ»	№ 338 от 12.09.2013
«VIBROS 2.2»	АО «ОКБМ Африкантов»	№ 354 от 17.04.2014
«RISKZONE V.1.0»	ООО «Ленэкофт+» и АО «АТОМПРОЕКТ»	№ 368 от 18.03.2015
«ВЫБРОС-3.1»	АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»	№ 395 от 14.07.2016
«СИБИЛЛА» (версия 1.0)	ИБРАЭ РАН	№ 396 от 14.07.2016

Аналогичные ПС разработаны и в других организациях атомной отрасли. Например, аттестованы ПС «VIBROS 2.2» (АО «ОКБМ Африкантов»), «ВЫБРОС-3.1» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), «ДОЗА 3.0» (АО «АТОМПРОЕКТ»). В этих ПС используется методика расчета выброса, основанная на Гауссовой модели рассеяния примесей в атмосфере, а также модели расчета дозовых нагрузок, основанные на использовании дозовых коэффициентов.

Основной проблемой при верификации таких ПС является то, что подобные методики сильно связаны с моделированием физики атмосферных процессов (метеорологии) и дальнейшим учетом различных путей попадания во внутренние органы человека радиоактивных элементов, влекущие за собой внутреннее облучение. Если по второму вопросу применение различных коэффициентов не вызывает особых дискуссий у экспертов и специалистов секции № 3, то по первому вопросу дискуссии носят острый характер и завершаются констатацией факта, что конкретных оценок точности подобных расчетов в аттестационном паспорте ПС представить невозможно. Заключение экспертизы подобных ПС обычно состоит в том, что с помощью таких ПС можно получить консервативные оценки последствий аварий только в определенной области их применения. В этой связи, строгое соблюдение области применения ПС и соответствующих ограничений применения, указанных в аттестационных паспортах ПС, приобретает особую важность.

ПС «НОСТРАДАМУС» (ИБРАЭ РАН) аттестовано для прогнозирования радиационной обстановки при выбросах радиоактивных материалов в аэрозольной и газовой форме в атмосферу. Для расчета концентрации радиоактивной примеси в атмосфере и плотности выпадений используется полуэмпирическое нестационарное уравнение адвекции-диффузии с учетом неоднородных полей ветра и коэффициента диффузии. При этом в результате верификации ПС получена

следующая оценка погрешности для величины приземной концентрации (для каждого радионуклида) в простых метеорологических условиях: «Отклонение величины приземной концентрации на расстояниях до 60 км с вероятностью 90% укладывается в один порядок величины. Отклонение максимума концентрации на оси следа на заданном расстоянии с вероятностью 90% не превышает 3».

В последние годы разрабатываются новые подходы для моделирования распространения выбросов, которые могут обеспечить более высокий уровень точности прогнозных расчетов. Например, в настоящее время в рамках деятельности секции № 3 планируется экспертиза ПС «РОУЗ», в котором реализован CFD-модуль позволяющий проводить расчеты полей скоростей ветра с учетом трехмерной геометрии моделируемой местности (застройка, холмы и прочее).

В АО «АТОМПРОЕКТ» разработано специализированное ПС «RISKZONE V.1.0» для расчета максимальных факторов разбавления/осаждения примесей выбросов радиоактивных веществ при наименее благоприятных условиях рассеяния в атмосфере с заданной обеспеченностью на определенном временном интервале в зависимости от расстояния и направления выброса. Расчет проводится на основе обработки стандартных гидрометеорологических, либо натуральных градиентных наблюдений, либо синтезированных рядов стандартных гидрометнаблюдений и данных реанализа. Результаты расчетов, полученных по ПС «RISKZONE V.1.0», используются в качестве исходных данных для ПС «ДОЗА 3.0», которое в свою очередь обеспечивает проведение расчетов эффективной дозы и эквивалентной дозы на отдельные органы и ткани при облучении населения в районе размещения АЭС от газоаэрозольных выбросов (рассчитываются внешнее облучение от радионуклидов в воздухе и осевших на поверхность земли и внутреннее облучение при ингаляции и потреблении загрязненных радионуклидами продуктов питания) и жидких сбросов (внутреннее облучение за счет потребления загрязненной радионуклидами пресноводной рыбы и питьевой воды).

ПС «СИБИЛЛА» (ИБРАЭ РАН) предназначено для расчетов параметров радиационной ситуации, формируемой в поверхностных пресноводных объектах при воздействии со стороны ОИАЭ. Входными параметрами для ПС «Сибилла» являются характеристики источников поступления радионуклидов (положение, интенсивность в зависимости от времени, нуклидный состав), морфометрические и гидрологические характеристики водных объектов, данные о водопользовании. Основными расчетными параметрами ПС «СИБИЛЛА» являются удельные (объемные) активности радионуклидов в воде водных объектов, эффективные дозы облучения различных групп населения от водопользования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваемые на секции № 3 «Расчеты радиационной защиты и радиационной безопасности» ПС, которые используются для моделирования радиационных последствий аварий, сопровождающихся выбросом радиоактивных веществ, применяются на заключительном этапе обоснования безопасности. Результаты расчетов, получаемые с помощью подобных ПС, лежат в основе обоснования безопасности и защиты населения и окружающей среды от радиационной опасности.

Вместе с тем, оценка погрешности результатов расчетов по таким ПС, сопряжена с некоторыми трудностями. Так как расчетные модели, которые реализованы в подобных ПС, опираются на решение задач физики атмосферы (метеорологии), связанных с переносом радиоактивных веществ и прогнозом погодных условий. При этом непосредственно для решения задачи о распространении активности в атмосфере используются методики, зафиксированные в документах различных организаций и различных сроков давности. Таким образом, строгое следование алгоритмам расчетов подобных методик является основным доводом при верификации ПС, а в аттестационных паспортах таких ПС фиксируется не обеспечиваемая ПС погрешность расчетов, а лишь тот факт, что ПС реализует методику, установленную в том или ином документе. При этом оценка самих документов выходит за рамки компетенции секции № 3.

При проведении в секции № 3 экспертизы остальных групп ПС (расчет источников активности и их распространения, моделирование переноса нейтронов и фотонов) проблем с определением погрешности расчетов, как правило, не возникает в том случае, если при разработке верификационного отчета учтены все требования РД-03-34-2000 «Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии».

