

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕНОСА И НАКОПЛЕНИЯ ТРИТИЯ И УГЛЕРОДА-14 В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Болотов А.А., Барчуков В.Г., Галузин А.С., Сурин П.П., Кочетков О.А., Еремина Н.А.

ФГБУ ГНЦ РФ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
123098, Москва, ул. Живописная, д. 46



Представлены подходы по созданию программного обеспечения (ПО) вычислительного модуля в соответствии с имитационной моделью накопления и распространения трития (H-3) и углерода-14 (C-14) в технологических системах водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), на основе которой разработана методика «Оценка накопления и распространения H-3 и C-14 в технологических системах АЭС». Алгоритм ПО построен таким образом, чтобы в точности воссоздать модель, описываемую в методике. Обозначения отслеживаемых параметров в ПО приняты максимально приближенно к оригинальной методике. Отслеживание состояний параметров реализовано через экземпляры специальных классов (базовый элемент объектно-ориентированного программирования), позволяющих описывать любые рассчитываемые параметры на основе трех информационных классов, программные экземпляры которых образуют иерархическую структуру. Это позволило использовать преимущества подходов и возможностей объектно-ориентированного программирования за счет выделения специальных методов доступа к параметрам, а также применения имен и индексов параметров для обеспечения их взаимодействия и вывода необходимой информации. Всего в ПО используется более 400 параметров. Структура ПО позволяет проводить моделирование распространения H-3 и C-14 в технологических системах ВВЭР-ТОИ (типовой оптимизированный информатизированный) за счет использования специального текстового файла задания. Результатом выполнения расчета являются два текстовых отчета: основной (краткий) и технический (полный).

Ключевые слова: радиационная безопасность, имитационная модель, тритий, углерод-14, распространение трития и радиоуглерода, водообмен, классы, программа для ЭВМ.

Для цитирования: Болотов А.А., Барчуков В.Г., Гапузин А.С., Сурин П.П., Кочетков О.А., Еремина Н.А. Компьютерное моделирование переноса и накопления трития и углерода-14 в технологических системах водо-водяных энергетических реакторов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 141–152. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.11>

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения безопасной эксплуатации атомных станций в настоящее время активно применяются различные комплексы программного обеспечения (ПО) [1–4]. Такое специализированное ПО позволяет выполнять оценки и расчеты параметров работы реакторных установок (РУ) без проведения дорогостоящих экспериментальных исследований, которые к тому же порой невозможно или трудоемко реализовать в реальной обстановке.

В радиационной безопасности расчетные коды и ПО позволяют на стадии проекта оценить воздействие радиационно опасного объекта на персонал, население и окружающую среду (ОС). Оценка активности радионуклидов в технологических средах, в выбросе и сбросе позволяет принимать проектные решения по повышению радиационной безопасности.

В настоящее время обращению с биогенными радионуклидами, такими как Н-3 и С-14, образующимися при работе РУ, уделяется особое внимание как в Российской Федерации, так и за рубежом [5–13].

При эксплуатации ВВЭР образуется порядка 10^{14} Бк/ГВт·год Н-3 [8]. Как показывают исследования, активность Н-3 в районе расположения атомных станций оценивается для АЭС с ВВЭР до 14 Бк/м^3 в воздухе и до 12 Бк/л в водоемах [9, 10]. Такая активность Н-3 в ОС создает дозу для населения на уровне $0,3\text{--}0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Зв/год}$ [11], что составляет порядка 30% от общей дозы, создаваемой АЭС. Большая часть Н-3 на ВВЭР образуется в теплоносителе первого контура, и удельная активность превышает критерий отнесения к жидким радиоактивным отходам [14] по Н-3 (10^3 кБк/кг). На обращение с такими технологическими средами, согласно п. 3.11.3 ОСПОРБ-2010 [14, 15], накладываются ограничения в части использования и вывода в ОС. В связи с этим встает вопрос о необходимости прогнозирования и оценке активности Н-3 в технологических системах, в сбросах и выбросах.

Как и Н-3, С-14 входит в перечень радионуклидов, создающих 99%-ные дозы [7]. В результате ядерных испытаний 60-х годов уровень техногенного С-14 существенно увеличился. После прекращения ядерных испытаний новым источником техногенного С-14 стала ядерная энергетика [16]. Образовавшийся в активной зоне С-14 вступает в соединения с кислородом, образуя СО и СО₂, и с водородом, образуя СН₄. Данные соединения выбрасываются через систему вентиляции в ОС. Наибольшую опасность для человека представляют газоаэрозольные выбросы С-14 с АЭС [12, 13, 17], из которых он поступает в продукты питания.

Выход С-14 с ВВЭР оценивается в 10^{12} Бк/ГВт·год [12, 13]. Для обоснования радиационной безопасности РУ также необходимо проведение исследований по оценке активности С-14 в технологических системах ВВЭР.

В 2018 г. специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России разработана имитационная модель накопления и распространения Н-3 и С-14 в технологических системах ВВЭР. Имитационная модель позволяет рассчитать активность Н-3 и С-14 в технологических системах ВВЭР, в сбросе и выбросе. Расчет активности этих радионуклидов позволяет с принятием новых технологических решений оценить радиационную безопасность ВВЭР.

На основе имитационной модели разработана методика МТ 1.1.4.02.1617-2019 «Оценка накопления и распространения Н-3 и С-14 в технологических системах АЭС» [18]. При разработке методики использовались как эксплуатационные данные действующих АЭС с ВВЭР, так и проектные материалы ВВЭР-ТОИ.

ВВЭР является технически сложным механизмом, при эксплуатации которого есть как непрерывные процессы, так и дискретные. Учет всех технических сложностей эксплуатации РУ и, в частности, водообмена, которые важны при оценке активности Н-3 и С-14, существенно осложняет ручной расчет активности Н-3 и С-14. В связи с данными фактами для обеспечения детального расчета активности Н-3 и С-14 разработано ПО, основанное на методике [18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В основе ПО, реализующего методику МТ 1.1.4.02.1617-2019 [18], используется разработанный вычислительный модуль под названием «Одуванчик».

Методика оценки накопления и распространения Н-3 и С-14 на ВВЭР-ТОИ моделирует 60 лет эксплуатации, включающих в себя кампанию продолжительностью 17 месяцев при работе на мощности и 30 суток в режиме останова на плановый ремонт. Схема распространения радионуклидов Н-3 и С-14 представлена на рис. 1.

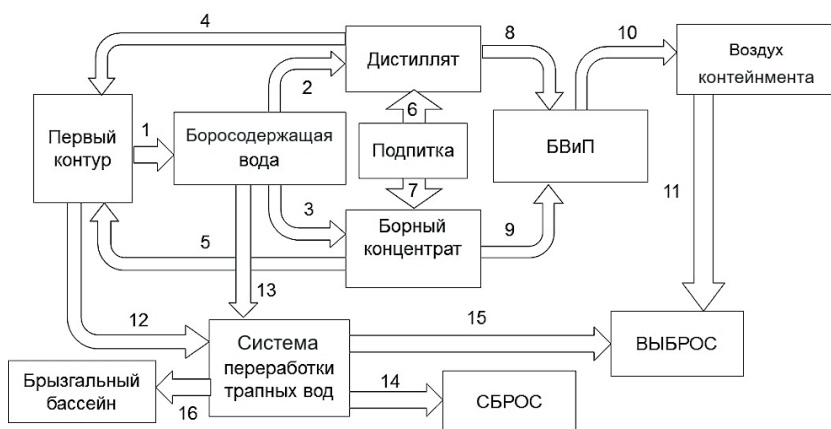


Рис. 1. Схема распространения радионуклидов С-14 и Н-3 в технологических контурах и системах ВВЭР-ТОИ

Водный баланс теплоносителя первого контура осуществляется за счет обеспечения определенного режима водообмена, подпитки первого контура дистиллятом с учетом неорганизованных и организованных протечек (за счет испарения), протечек из первого контура во второй.

Потери теплоносителя в системе водообмена формируются за счет

- протечек в системе очистки теплоносителя первого контура (*KBF* направление 13, 14 и 16);
- утечек пара при выпаривании.

Модель водообмена на ВВЭР-ТОИ, лежащая в основе расчета распространения Н-3 и С-14, согласно методике [18], приведена на рис. 2. Она представляет собой обобщенную систему водообмена.

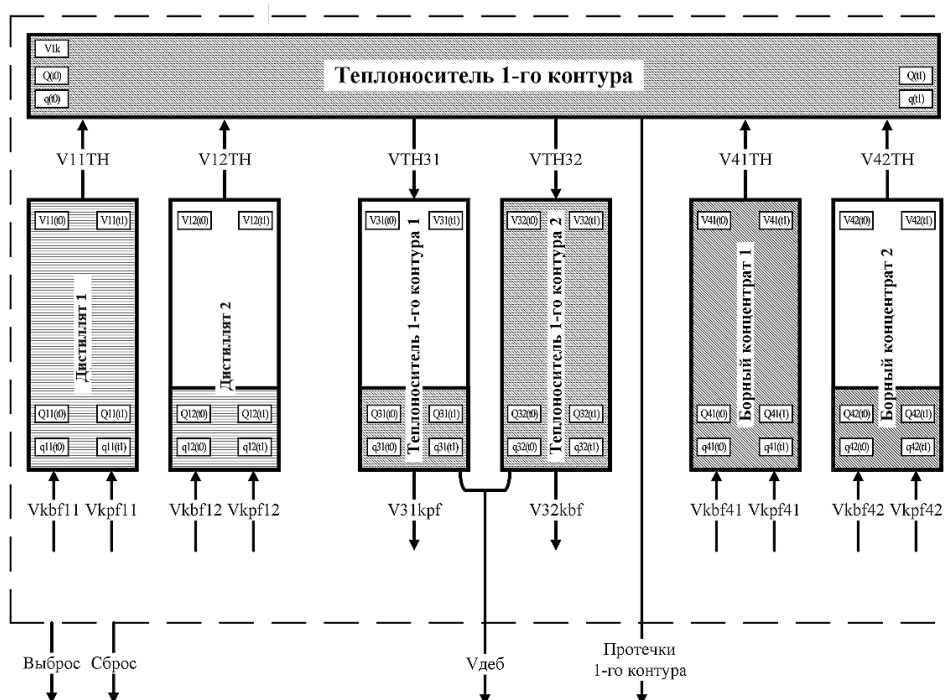


Рис. 2. Информационная модель водообмена ВВЭР-ТОИ

N-3 образуются в активной зоне ВВЭР-ТОИ за счет облучения нейтронами урана и трансурановых элементов в топливе и в теплоносителе при облучении бора. C-14 образуется при облучении N-14 и O-17 в теплоносителе первого контура. В процессе водообмена радионуклиды распространяются по технологическим контурам ВВЭР-ТОИ, включающим в себя баки вод первого контура (10КВВ10, направление 1), баки дистиллята (10КВС10 направление 2, 4 и 8) и баки борного концентрата (10КВС40 направление 3, 5 и 9), а также в процессе формирования выброса и сброса. Все объекты модели имеют входные и выходные потоки жидкостей, поименованные и отображенные соответствующими стрелками. Дебалансные воды, все протечки (включая неорганизованные, между 1 и 2 контурами ВВЭР-ТОИ, в системе очистки КВФ), выброс и сброс в схеме указаны условными элементами в виде стрелок.

Выброс N-3 осуществляется за счет испарения воды с поверхности бассейна выдержки и перегрузки (БВиП) при работе на мощности и объединенной водной поверхности во время останова (направление 10 и 11), а также за счет испарения неорганизованных и организованных протечек вод первого контура (направление 15).

Выброс C-14 происходит при очистке теплоносителя от газов в деаэраторе (направление 11) за счет десорбции с поверхности БВиП при работе энергоблока на мощности и объединенной водной поверхности во время останова, а также за счет десорбции при неорганизованных и организованных протечках вод первого контура (направление 15).

Сброс N-3 и C-14 в ОС, согласно методике [18], происходит с дебалансными водами, а также в грунтовые воды за счет протечек трубопроводов.

Индексы *kbf* либо *kpf* у символов означают принадлежность к системе очистки теплоносителя первого контура (КВФ) и системе очистки трапных вод (КПФ) соответственно.

Дебалансные воды – очищенные воды, образующиеся после переработки жидких радиоактивных средств и не подлежащие повторному использованию.

Активность Q_i и объемная активность q_i Н-3 и С-14 на схеме отражаются двумя значениями: в начале расчетного периода и в конце его в соответствии с методикой [18]. Все элементы этих объектов являются функцией от времени.

Основные неизменные характеристики оборудования и параметров технологических сред ВВЭР-ТОИ, а также динамика водообмена первого контура и системы очистки теплоносителя первого контура *KBF* при работе энергоблока на мощности (в течение 17-ти месяцев) и в режиме останова определены в виде исходных данных (констант) для ПО расчета распространения Н-3 и С-14 по системам ВВЭР-ТОИ. Всего в методике [18] используется около 40 параметров-констант, таких как образование Н-3 и С-14 за кампанию, объем теплоносителя первого контура, объемы трапных вод, поступающих на очистку, объемы баков различных систем ВВЭР-ТОИ, доли чистого дистиллята в подпитке баков, расход неорганизованных протечек, различные коэффициенты перехода и т.п. Изменяемые исходные параметры для расчета задаются в текстовом файле-задании и содержат данные по объемам водообмена первого контура и системы *KBF* в течение 17-ти месяцев, объемам дебалансных вод, объемам вод из систем очистки *KBF*, *KPF* в баки дистиллята, теплоносителя, борного концентрата и др.

Активность Н-3 и С-14 на ВВЭР-ТОИ рассчитывается на основании набора рекуррентных формул (в соответствии с методикой [18]) с временным периодом в один месяц. Исходные данные задаются на момент ввода энергоблока в эксплуатацию. По окончании расчета определяется активность Н-3 и С-14 в контурах и средах ВВЭР-ТОИ со сдвигом на один месяц. Полученные значения активности используют в качестве исходных данных для расчетов в течение следующего временного периода.

В начальный момент времени первый контур, баки системы чистого дистиллята 10КВС10, баки запаса борного концентрата 10КВС40, баки системы хранения теплоносителя эксплуатационного качества 10КВВ10, БВиП заполнены водными средами с объемной активностью Н-3 и С-14 на уровне фона.

При проведении расчета активности Н-3 и С-14 во время планового ремонта также используют рекуррентные формулы для режима останова энергоблока. Временной период при этом равен времени планового ремонта – 30 суток, капитального планового ремонта – 45 суток.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Архитектура ПО выбрана модульной для сосредоточения усилий при разработке на аналитической части и обеспечении возможности дальнейшего совершенствования программы путем подключения дополнительных модулей. Для простоты пользовательский интерфейс сведен к минимуму – в качестве интерфейса ввода-вывода информации (заданий и результатов расчетов) используются формы в виде текстовых файлов. Для соблюдения преемственности методы (процедуры и функции) в исходном коде оформлены дословно, как в методике, с соответствующей нумерацией. Алгоритм ПО вычислительного модуля был построен таким образом, чтобы в точности и без ошибок воссоздать модель, описываемую в методике [18].

Обозначения отслеживаемых параметров в ПО приняты максимально приближенно к оригинальной методике МТ 1.1.4.02.1617-2019 [18] с целью наибольшего соответствия компьютерной модели и модели, представленной в методике. Отслеживание состояний параметров реализовано через экземпляры специальных классов. Это позволило исполь-

зовать преимущества подходов и возможностей объектно-ориентированного программирования [19] для уменьшения возможных ошибок в ПО за счет выделения специальных методов доступа к параметрам, а также использования имен и индексов параметров для обеспечения их взаимодействия и вывода необходимой информации в различные отчеты.

При переносе методики МТ 1.1.4.02.1617-2019 [18] в ПО реализован дополнительный функционал, такой как детальное хранение всех состояний всех параметров модели в каждой итерации моделируемого периода, соответствующих началу, концу и за весь период каждой итерации расчета. Помимо удобства реализации алгоритма в исходном коде ПО такой подход дал определенные преимущества в виде возможности детального анализа протекания процессов в модели и отладки самой модели.

Модуль расчета обеспечивает вычисление активности и объемной активности во всех технологических элементах ВВЭР-ТОИ, включая первый контур, воду второго контура, во всех объектах баковой системы, сбросе и выбросе.

Для модуля расчета активности Н-3 и С-14 предложен рациональный набор информационных объектов, позволяющих просто и удобно описывать любые рассчитываемые параметры на основе трех основных классов (абстрактных сущностей в виде структур данных и алгоритмов работы с ними): `TParam`, `TMonthStep` и `TMonthSteps`, экземпляры которых образуют иерархическую структуру. Это позволило получать и одновременно хранить значения состояний всех параметров компьютерной модели на всем исследуемом интервале времени.

Каждый вышестоящий в иерархии класс наследует свойства нижестоящего класса и содержит другие необходимые элементы (свойства и методы), обеспечивающие получение информации о данном параметре по всем кампаниям и циклам работы РУ.

TParam – класс состояния параметра расчета, содержащий поля с именем параметра и его значением, флагами контроля записи. В классе содержатся методы для чтения (записи) этих полей. Любое возможное значение вне зависимости от типа хранится в виде числа с плавающей точкой, что накладывает некоторые технические ограничения, но позволяет придерживаться принципа унификации. В качестве значения могут содержаться технические коды. Экземпляр данного класса может содержать состояние параметра модели в конкретный момент времени.

TMonthStep – класс состояний всех параметров в итерации, содержащий поле с массивом состояний параметров для расчета на один месяц, методы для работы с массивом состояний параметров в данной итерации, данные по водообмену. Обращение к состояниям параметров может осуществляться как по индексам, так и по их имени, что упрощает использование параметров в процедурах расчета и вывода информации. Чтение их содержимого доступно через встроенные методы в различных форматах и типах данных. Экземпляр данного класса используется для хранения и работы с набором состояний всех параметров в конкретный момент времени (итерацию).

TMonthSteps – класс всех итераций расчета. В ПО существует в единственном экземпляре в отличие от двух других. Используется для хранения массива экземпляров класса `TMonthStep` (состояний списка параметров в конкретный момент времени). Массив в совокупности отображает набор состояний списка параметров модели на протяжении всего исследуемого интервала времени (всех итераций). Также класс содержит методы расчета и получаемые в качестве их результата данные.

Такой подход позволил обеспечить достаточно гибкое и удобное использование всех параметров расчета, их вывод на периферийные устройства, в файлы, а также организа-

цию интерфейсов с пользователями для настройки режима расчета, параметров вывода и процедур оптимизации расчета активности Н-3 и С-14.

Всего в ПО используется более 400 параметров.

Результатом выполнения расчета являются два текстовых отчета:

- основной (краткий) отчет *report.txt* включает в себя 13 основных показателей активности Н-3 и С-14 в технологических средах РУ (в первом контуре, сбросе, выбросе и баках);
- «технический» (полный) отчет *report_tech.dnt* включает в себя все показатели, используемые в модуле расчета.

В методике используются 40 входных параметров в виде констант, определяющих характеристики оборудования и технологической среды конкретного вида энергоблока, а также 23 входные параметра исходных данных, значения которых могут варьироваться в зависимости от особенностей конкретного энергоблока, условий водообмена и т.п. Остальные параметры представляют собой значения динамических характеристик системы энергоблока в конкретный момент времени, определяемых через формулы методики [18]. Ключевыми параметрами для имитационной модели являются образование Н-3 и С-14, величина объема водообмена первого контура и системы *KBF* при работе энергоблока на мощности. Неопределенность модельных расчетов с учетом неопределенностей параметров определяется методикой [18] и составляет для Н-3 – 32%, а для С-14 – 31%. Верификация и валидация имитационной модели проводилась в рамках разработки методики [5, 18]. Результаты расчета активностей Н-3 и С-14 при помощи ПО совпали с результатами измерения этих активностей в пределах погрешности 35% [5].

В настоящее время ПО разработано в средах *RAD STUDIO 11*, *LAZARUS* [20, 21]. Архитектура и применяемые при проектировании подходы основаны на современных и перспективных международных отраслевых практиках, таких как модульность, кроссплатформенность (для Windows, Linux), поддержка и использование систем с открытым исходным кодом, использование прозрачных (общедоступных) интерфейсов обмена данными.

Разработанное ПО использовалось для оценки прогнозных активностей Н-3 в технологических контурах Курской АЭС-2 для реакторов типа ВВЭР-ТОИ на 60-летний период времени. Примеры расчета активности Н-3 и С-14 в первом контуре и активности выброса и сброса представлены на рис. 3, 4.

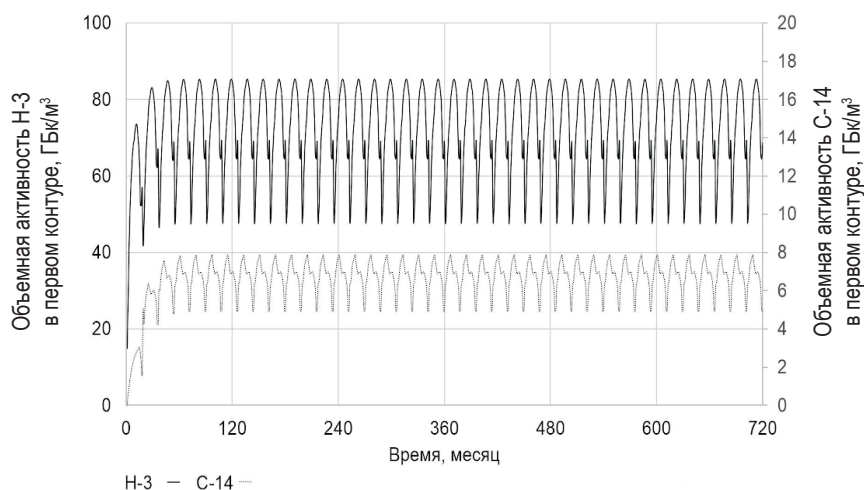


Рис. 3. Объемная активность Н-3 и С-14 в первом контуре ВВЭР-ТОИ

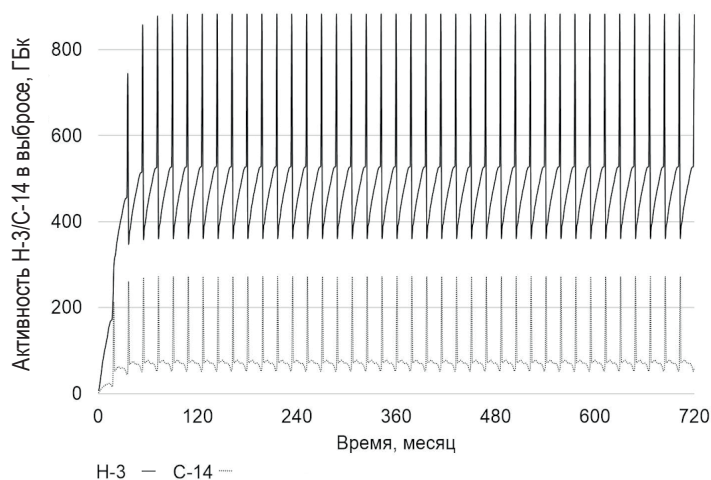


Рис. 4. Активность выброса Н-3 и С-14 ВВЭР-ТОИ в месяц

Как можно увидеть из рисунков 3, 4, активность Н-3 и С-14 в течение первых кампаний возрастает. Однако после пятой кампании динамика изменения активности Н-3 и С-14 от кампании к кампании становится стабильной. Это связано с наступлением векового равновесия для Н-3, а для С-14 отсутствие накопления связано с удалением его из технологических сред как в результате протечек, так и технологическим путем. Активность выброса Н-3 и С-14 изменяется пропорционально активности трития в первом контуре во время работы на мощности. Во время проведения планового и капитального ремонтов активность Н-3 и С-14 в выбросе существенно увеличивается за счет разгерметизации контейнента и объединения БВиП и надреакторного пространства, с которых идет интенсивное испарение Н-3 и С-14 в воздух.

ВЫВОДЫ

Разработанное ПО расчета показателей активности Н-3 и С-14 в технологических контурах ВВЭР-ТОИ увеличивает научно-практическую значимость методики [18], позволяет существенно ускорить получение оценки этих показателей для поддержки как проектных, так и эксплуатационных решений.

Полученная по результатам расчета активность Н-3 и С-14 в технологических системах позволит оценить необходимые уровни очистки технологических сред и применимость технологий очистки от Н-3 и С-14.

Разработанные структуры данных (классы, файлы заданий и настроек) позволили упростить расчет и взаимодействие с пользователями по выбору режимов расчета и представления результатов.

Использование подходов объектно-ориентированного программирования допускает реализацию ПО для различных платформ (в том числе *Linux*).

Литература

1. Грачев В.А., А.Б. Сазонов, Задонский Н.В. и др. Образование и распределение трития в первом контуре ВВЭР: математическое моделирование. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2. – С. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.17223/00213411/64/2-2/20>

2. Беликов В.В., Головизнин В.М., Катышков Ю.В. и др. Нострадамус – компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси. // Труды ИБРАЭ. – 2008. – Выпуск 9. – С. 41–102.
3. Arkadov G.V., Kroshilin A.E., Parshikov I.A., Solov'ev S.L., Shishov A.V., Zhukavin A.P. The Virtual Digital Nuclear Power Plant: a Modern Tool for Supporting the Lifecycle of VVER-based Nuclear Power Units. *Thermal Engineering*. – 2014. – V. 61. – № 10. – PP. 697–705. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514100012>.
4. Задонский Н.В., Сазонов А.Б., Грачев В.А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021667835. Образование, распределение и накопление трития в технологических средах (RU); Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное учреждение Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». – № 2021667241; заявл. 28.10.2021; опубл. 03.11.2021, 1 с.
5. Кочетков О.А., Анпилогова И.Н., Барчуков В.Г. и др. Имитационная модель как возможность описания процесса переноса и накопления нуклидов. // *Ядерная и радиационная безопасность*. – 2022. – № 3(105). – С. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2022.105.3.002>
6. Екидин А.А., Васильев А.В., Мурашова Е.Л., Курьиндин А.В. Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период. // *Ядерная и радиационная безопасность*. – 2014. – № 3(85). – С. 35–45.
7. Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 №1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды», 30 с.
8. The IAEA Database on Discharges of Radionuclides to the Atmosphere and the Aquatic Environment (DIRATA). Электронный ресурс: <https://dirata.iaea.org> (дата доступа 19.04.2023).
9. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Максимов А.А. и др. Распространение трития и его соединений в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Калининской АЭС. // *Медицина труда и промышленная экология*. – 2021. – 61(9). – С. 594–600. DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600>
10. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Фомин Г.В. и др. Распространение трития и его соединений воздушным путем при нормальных условиях эксплуатации Балаковской АЭС. // *Аппаратура и новости радиационных измерений (АНРИ)*. – 2016. – № 1(84). – С. 49–54. Электронный ресурс: <https://anry.pro/article/210> (дата доступа 19.04.2023).
11. Vasyanovich M.E., Ekin A.A., Vasilyev A.V. et al. Determination of Radionuclide Composition of the Russian NPPs Atmospheric Releases and Dose Assessment to Population. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2019. – V. 208–209. – P. 106006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106006>
12. Крышев А.И., Васянович М.Е., Екидин А.А., Филатов Ю.Н., Мурашова Е.Л. Поступление трития в атмосферу с выбросами АЭС с ВВЭР и оценка дозы облучения населения. // *Атомная энергия*. – 2020. – Т. 128. – Вып. 6. – С. 333–337. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3194/4167> (дата доступа 19.04.2023).
13. Радиэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева). – М.: 2021. – 555 с.
14. Санитарные правила и нормативы. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (с Изменением 1). ОСПОРБ-99/2010: утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40. – 100 с.
15. Постановление Правительства РФ от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (в ред. от 04.02.2015 № 95).
16. Рублевский В.П., Яценко В.Н., Чанышев Е.Г. Роль углерода-14 в техногенном облучении человека (под ред. О.А. Кочеткова). – М.: ИздАТ, 2004. – 197 с. ISBN 5-86656-160-3.

17. Барчуков В.Г., Кочетков О.А., Клочков В.Н., Еремина Н.А., Сурин П.П., Максимов А.А., Кабанов Д.И., Величко В.К., Богданенко Н.А., Алсагаев Ж.И. Распространение углерода-14 в окружающей среде при нормальных условиях эксплуатации Курской АЭС. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2023. – Т. 68. – № 1. – С. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33>

18. О введении в действие методики МТ 1.1.4.02.1617-2019 «Оценка накопления и распространения трития и радиоуглерода в технологических схемах атомных станций»: приказ Генерального директора АО «Концерн Росэнергоатом» Петрова А. Ю. № 9/01/381-П от 10.03.2021.

19. Васильев А.Н. Java. Объектно-ориентированное программирование. Базовый курс по объектно-ориентированному программированию. – Москва – Санкт-Петербург – Киев, 2000. – 719 с.

20. Гуриков С.Р. Программирование в среде Lazarus. – 2023. ISBN 978-5-00091-555-4.

21. Копылов А. З. Лычагин Ю.В., Осипов В.И. Среда разработки ПО Embarcadero RAD Studio 10.3 Rio: учебное пособие. – Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2019. – 27 с.

Поступила в редакцию 15.01.2024

Авторы

Болотов Александр Александрович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.

E-mail: abolotov@bk.ru

Барчуков Валерий Гаврилович, заведующий лабораторией, профессор, д.мед.н.

E-mail: barchval@yandex.ru

Галузин Александр Сергеевич, инженер,

E-mail: alexserg_n@mail.ru

Сурин Павел Петрович, младший научный сотрудник,

E-mail: psurin@fmbcfmba.ru

Кочетков Олег Анатольевич, ведущий научный сотрудник, к.т.н.

E-mail: kochetkov2oleg@list.ru

Еремина Наталья Александровна, младший научный сотрудник,

E-mail: eremina-na@mail.ru

UDC 614.876

Computer Simulation of Transport and Accumulation of Tritium and Carbon-14 in Technological Systems of Pressurized Water Reactors

Bolotov A.A., Barchukov V.G., Galuzin A.S., Surin P.P., Kochetkov O.A., Eremina N.A.

State Research Center – Bumasyan Federal Medical Biophysical Center of the Federal Medical Biological Agency (SRC-FMBC),

46 Zhivopisnaya St., 123098 Moscow, Russia

Abstract

The paper presents approaches to the development of a computing modulesoftwarein accordance with the simulation model of accumulation and distribution of tritium and carbon-14 in technological systems of pressurized water reactors (PWR),on the basis of which the methodology «Assessment of accumulation and distribution of H-3 and C-14 in technological systems of nuclear power plants» has been developed. The software algorithm has been built such that to reproduce the model described in the methodology accurately. The designations of the monitored parameters in the software were adopted as close as possible to the original methodology. Monitoring of parameter state is implemented by instances of special classes

(basic element of object-oriented programming) that allow describing any calculated parameters based on three information classes, the program instances of which form a hierarchical structure. This made it possible to take advantage of the approaches and capabilities of object-oriented programming by allocating special methods for accessing parameters, as well as using parameter names and indexes to ensure their interaction and output the necessary information. In total, the software uses more than 400 parameters. The software structure makes it possible to simulate the propagation of tritium and carbon-14 in PWR technological systems by using a special task text file. The result of the calculation is two reports: the main (short) and technical (full).

Keywords: radiation safety, simulation model, tritium, carbon-14, tritium/radiocarbon propagation, water exchange, classes, computer program.

For citation: Bolotov A.A., Barchukov V.G., Galuzin A.S., Surin P.P., Kochetkov O.A., Eremina N.A. Computer Simulation of Transport and Accumulation of Tritium and Carbon-14 in Technological Systems of Pressurized Water Reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2024, no. 3, pp. 141–152; DOI: <https://doi.org/10.26583/ipe.2024.3.11> (in Russian)..

References

1. Grachev V.A, Sazonov A.B., Bystrova O.S., Zadonskaya Y.N., Zadonsky N.V. Formation and distribution of tritium in the primary circuit of VVER: numerical simulation. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2021, v. 64, no. 2-2, pp. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.17223/00213411/64/2-2/20> (in Russian).
2. Belikov V.V., Goloviznin V.M., Katishkov Y.V., Semenov V.N., Starodubceva L.P., Sorokovikova O.C., Fokin A.L. Nostradamus – a computer system for predicting the radiation situation. Verification of the model of atmospheric transport of impurities. *Proc. of IBRAE*. 2008., no. 9, pp. 41–102 (in Russian).
3. Arkadov G.V., Kroshilin A.E., Parshikov I.A., Solov'ev S.L., Shishov A.V., Zhukavin A.P. The Virtual Digital Nuclear Power Plant: a Modern Tool for Supporting the Lifecycle of VVER-based Nuclear Power Units. *Thermal Engineering*. 2014, v. 61, no. 10, pp. 697–705. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0040601514100012>
4. Zadonsky N.V., Sazonov A.B., Grachev V.A. Certificate of state registration of the computer program RU 2021667835. Formation, distribution and accumulation of tritium in technological media (RU); Copyright holder: Federal State Budgetary Institution National Research Center «Kurchatov Institute». No. 2021667241; application 10/28/2021; published 03.11.2021, 1 p. (in Russian).
5. Kochetkov O.A., Anpilogova I.N., Barchukov V.G., Kovyazin V.L., Maximov A.Y., Surin P.P. Simulation model as a possibility of describing the process of transfer and accumulation of nuclides. *Nuclear and radiation safety journal*. 2022, no. 3(105), pp. 15–27. DOI: <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2022.105.3.002> (in Russian).
6. Ekinin A.A., Vasilyev A.V., Murashova E.L., Kuryndin A.V. Estimation of tritium entry into the atmosphere from the spray pools of the Balakovo NPP during the cold period. *Nuclear and radiation safety journal*. 2014, no. 3(85), pp. 35–45 (in Russian).
7. Decree of the Government of the Russian Federation of 08.07.2015 No. 1316-r «On approval of the list of pollutants subject to state regulation measures in the field of environmental protection», 30 p. (in Russian).
8. The IAEA database on discharges of radionuclides to the atmosphere and the aquatic environment (DIRATA). Available at: <https://dirata.iaea.org> (accessed Apr 19, 2023).
9. Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Klochkov V.N., Eremina N.A., Maksimov A.A. Distribution of tritium and its compounds in the environment under normal conditions of operating of Kalininskaya nuclear power plant. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*. 2021, 61(9), pp. 594–600. DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2021-61-9-594-600> (in Russian).
10. Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Fomin G.V., Kabanov D.I., Ivanov E.A. Distribution of tritium and

its compounds by air under normal operating conditions of the Balakovo NPP. *ANRI*, 2016, no. 1 (84), pp. 49–54. Available at: <https://anry.pro/article/210> (accessed Apr 19, 2023) (in Russian).

11. Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Vasilyev A.V., Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kosykh I.V., Kapustin I.A. Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2019, v. 208–209, p.106006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106006>.

12. Kryshev A.I., Vasyanovich M.E., Ekidin A.A., Filatov Yu.N., Murashova E.L. Tritium entry into the atmosphere with emissions from NPP-VVER and population irradiation dose assessment. *Atomic Energy*. 2020, vol. 128, no. 6, pp. 362–367. DOI : <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00703-0>

13. Radioecological situation in the regions where enterprises of the State Atomic Energy Corporation Rosatom are located (edited by I.I. Linge and I.I. Kryshev). Moscow, 2021, 555 p. (in Russian).

14. Sanitary rules and regulations. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (with Amendment 1). OSPORB-99/2010: approved. Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated April 26, 2010, no. 40, 100 p. (in Russian).

15. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 19.10.2012 no. 1069 «O kriteriyah otneseniya tverdyh, zhidkikh I gazoobraznyh othodov k radioaktivnym othodam, kriteriyah otneseniya radioaktivnyh othodov k osobym radioaktivnym othodam i k udalyaemym radioaktivnym othodam I kriteriyah klassifikacii udalyaemyh radioaktivnyh othodov» (red. 04.02.2015 no. 95) (in Russian).

16. Rublevsky V.P., Yacenko V.N., Chanyshev E.G. *The role of carbon-14 in human technogenic exposure* (edit. O.A. Kochetkov). Moscow, IzdAT, 2004. 197 p. ISBN 5-86656-160-3 (in Russian).

17. Barchukov V.G., Kochetkov O.A., Klochkov V.N., Eremina N.A., Surin P.P., Maximov A.A., Kabanov D.I., Velichko V.K., Bogdanenko N.A., Alsagaev Zh.I. Distribution of carbon-14 in the environment under normal operating conditions of the Kursk NPP. *Medical Radiology and Radiation Safety*. 2023, v. 68, no. 1, pp. 25–33. DOI: <https://doi.org/10.33266/1024-6177-2023-68-1-25-33> (in Russian).

18. O vvedenii v deistvie metodiki MT 1.1.4.02.1617-2019 «Otsenka nakopleniya I rasprostraneniya tritiya I radiougleroda v tekhnologicheskikh skhemakh atomnykh stantsii». Order of JSC «Concern Rosenergoatom» General Director Petrov A.Yu. No. 9/01/381-P, 10.03.2021 «On the introduction of the MT 1.1.4.02.1617-2019», 2021 (in Russian).

19. Vasilyev A.N. *Java. Object-oriented programming. Basic Course in Object-Oriented Programming*. Moscow -St. Petersburg-Kiev, 2000, 719 p. (in Russian).

20. Gurikov S.R. *Programming in the Lazarus environment*. 2023. ISBN 978-5-00091-555-4 (in Russian).

21. Kopylov A.Z., Lychagin Yu.V., Osipov V.I. *Embarcadero RAD Studio 10.3 Rio Software Development Environment Tutorial*. St. Petersburg: BSTU «Voenmekh» im. D.F. Ustinova, 2019. 27 p. (in Russian).

Authors

Alexander A. Bolotov, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: abolotov@bk.ru

Valery G. Barchukov, Head of the Laboratory, prof., Dr. Sci. (Med.)
E-mail: barchval@yandex.ru

Alexander S. Galuzin, Engineer,
E-mail: alexserg_n@mail.ru

Pavel P. Surin, Junior Researcher,
E-mail: psurin@fmbcfmba.ru

Oleg A. Kochetkov, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: kochetkov2oleg@list.ru

Natalia A. Eremina, Junior Researcher,
E-mail: eremina-na@mail.ru