

Активация теплоносителя в водо-водяных исследовательских реакторах

Рассмотрен процесс генерации трития в водо-водяных исследовательских реакторах бассейнового типа на примере ИР-100 и расчет объемной активности теплоносителя, наводимой генерируемым тритием.

Ключевые слова: генерация, радионуклид, теплоноситель, активная зона, тритий.

М. О. Фролова, П. А. Пономаренко

Активация теплоносія у водо-водяних дослідницьких реакторах

Розглянуто процес генерації тритію у водо-водяних дослідницьких реакторах басейнового типу на прикладі ДР-100 та розрахунок об'ємної активності теплоносія, що наводиться генеруванням тритієм.

Ключові слова: генерація, радіонуклід, теплоносія, активна зона, тритій.

Ядерные энергетические установки генерируют много радионуклидов различной биологической значимости: радиоуглерод, тритий, аргон-41 и др. Однако благодаря герметичности контуров энергоустановок радиоактивные углерод и водород почти не попадают в окружающую среду.

Генерируемые в активной зоне исследовательских реакторов бассейнового типа радионуклиды могут попасть в воздушную среду реакторных помещений. В частности, исследовательский реактор ИР-100, будучи реактором указанного типа, является потенциальным источником радиоуглерода и трития. Настоящая статья посвящена анализу генерации трития в активной зоне исследовательского реактора ИР-100 и путей его распространения в окружающую среду.

При работе реактора теплоноситель находится в области интенсивных нейтронных потоков и приобретает радиоактивность, которая сохраняется некоторое время (иногда значительное) после воздействия нейтронного излучения. Это обстоятельство значительно затрудняет обслуживание механизмов и коммуникаций первого контура, ограничивает доступ к ним, а иногда требует установки соответствующей биологической защиты.

Характер излучения активированного теплоносителя определяется его нуклидным составом, так как каждый из нестабильных нуклидов, образующихся под действием нейтронов, имеет свой период полураспада, природу и спектр излучения.

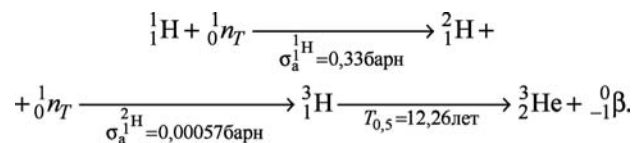
Следует различать собственную активность теплоносителя и активность его примесей. Активность примесей является дополнительным источником излучения, интенсивность которого можно снизить соответствующей очисткой теплоносителя. В процессе работы ядерной энергетической установки теплоноситель загрязняется вследствие вымывания продуктов коррозии и эрозии элементов, входящих в состав материалов коммуникаций первого контура. Поэтому в целях снижения уровня наведенной активности часто устанавливают постоянно действующую систему очистки теплоносителя.

По характеру радиоактивности теплоносители можно классифицировать следующим образом:

- теплоносители, быстро теряющие радиоактивность после остановки реактора (вода, азот);
- теплоносители, медленно теряющие радиоактивность после остановки реактора (натрий, калий, углекислый газ).

Расчет активности циркулирующего по замкнутому контуру теплоносителя усложняется необходимостью учета специфических условий активации, определяемых временем пребывания теплоносителя в областях с большими плотностями нейтронных потоков, кратностью циркуляции и т. д. Наведенную активность теплоносителя можно подсчитать следующим образом. Пусть за время полного цикла циркуляции по контуру T активирующиеся ядра дейтерия, входящего в состав теплоносителя, в течение времени $t_{a,3}$ находятся в активной зоне и облучаются нейтронами, образуя радиоактивные ядра трития.

Генерация трития в активной зоне исследовательского реактора ИР-100 описывается следующей физической моделью [1]:



Скорость образования активных ядер определяется количеством актов взаимодействия нейтронов с ядрами дейтерия, происходящих в единицу времени [2]:

$$\omega_D = \rho_D \cdot \int_0^{\infty} \varphi(E) \cdot \sigma_{ад}(E) dE, \quad (1)$$

где ρ_D — ядерная плотность ядер дейтерия, взята из [3] и скорректирована с учетом средней температуры теплоносителя по активной зоне реактора ИР-100; $\varphi(E)dE$ — плотность потока нейтронов энергии в интервале от E до $E+dE$ по объему активной зоны, которую для расчета можно заменить средней для тепловых нейтронов; $\sigma_{ад}$ — микроскопическое сечение реакции поглощения нейтронов энергии E_T ядрами дейтерия, приводящей к активации; это значение взято для стандартных нейтронов [3] и осреднено через вычисление температуры нейтронного газа в работающем реакторе [4, формула (6.10.9)].

Как видно из приведенной физической модели генерации трития, в процессе образования радиоактивного водорода большую роль играют нейтроны тепловых энергий; плотность потока их измерена экспериментально с помощью сусального золота с учетом осреднения [5] и равна $2,86819 \cdot 10^{12}$ н·см⁻²·с⁻¹.

Формула (1) справедлива, если предположить, что в результате каждого акта поглощения нейтронов ядрами дейтерия образуется одно радиоактивное ядро трития.

Скорость радиоактивного распада трития ядер равна $\lambda_T n_T$ (λ_T — постоянная радиоактивного распада радионуклида).

Уравнение баланса активных ядер в единице объема теплоносителя можно записать так:

$$\frac{dn_T}{dt} = \omega_T - \lambda_T \cdot n_T. \quad (2)$$

Решение уравнения при условии $n_T(0) = 0$ имеет вид

$$n_T(t) = \frac{\omega_T}{\lambda_T} (1 - e^{-\lambda_T t}). \quad (3)$$

Обозначим через $t_{a.з}$ время прохождения теплоносителям активной зоны, через t_x — время, необходимое для транспортировки теплоносителя по контуру от выхода из активной зоны до того места контура, в котором измеряют активность. Тогда за время $t_{a.з} + t_x$ вследствие радиоактивного распада число ядер в единице объема теплоносителя равно

$$n_T(t_{a.з}, t_x) = \frac{\omega_T}{\lambda_T} (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x}. \quad (4)$$

Время прохождения теплоносителя по циркуляционному контуру вычислялось с учетом объема первого контура и расхода теплоносителя через активную зону. Расход вычислялся с учетом изменения энтальпии теплоносителя между входом и выходом по температурному перепаду в активной зоне.

Количество циклов прохода теплоносителя по контуру определялось с учетом работы реактора на мощности и времени обращения теплоносителя. В связи с испарениями теплоносителя в окружающую среду и его ежедневным доливом водой высокой чистоты, в момент долива

происходило скачкообразное изменение удельной активности. Поскольку эти изменения незначительны (менее 2 %), ими можно пренебречь. Таким образом, доля загрязнения рассчитывается исходя из суммарного испарения воды первого контура с различными значениями удельной активности теплоносителя, наводимой тритием.

Активность единицы объема теплоносителя, т. е. удельную активность, обусловленную распадом радиоактивных ядер трития после однократного прохождения активной зоны, можно записать так:

$$A_{T_1} = \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x}. \quad (5)$$

После второго прохождения теплоносителем активной зоны активность его в точке замера будет равна

$$\begin{aligned} A_{T_2} &= \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T (t_x + T)} + \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x} = \\ &= \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x} \cdot (1 + e^{-\lambda_T T}). \end{aligned} \quad (6)$$

Спустя n циклов

$$A_{T_n} = \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x} (1 + e^{-\lambda_T T} + \dots + e^{-(n-1)\lambda_T T}). \quad (7)$$

При достаточно большом числе циклов n справедливо соотношение $\sum_{i=0}^n e^{-ix} = \frac{1 - e^{-nx}}{1 - e^{-x}}$.

Поэтому для длительного стационарного режима работы установки выражение (7) может быть записано следующим образом:

$$A_{T_n} = \omega_T (1 - e^{-\lambda_T t_{a.з}}) \cdot e^{-\lambda_T t_x} \left[\frac{1 - e^{-(n-1)\lambda_T T}}{1 - e^{-\lambda_T T}} \right]. \quad (8)$$

Подставив в уравнение (8) все имеющиеся данные, характеризующие работу исследовательского реактора ИР-100, получим, что активность теплоносителя, наведенная тритием, за время между плановыми ремонтами реактора, которое составляет 10 месяцев, в двусменном режиме на мощность 100 %, равна $3,115 \cdot 10^6$ Бк. Если учесть испарение трития с водой и проникновение паров радиоактивного пара в надреакторное помещение, то удельная активность трития, равная 8268 Бк·м⁻³ (отношение активности трития к объему надреакторного помещения), будет ниже допустимых концентраций в воздухе рабочих помещений РС_A^{inhal} для категории А [6], что соответствует удельной активности теплоносителя $0,79$ Бк·см⁻³. При испарении ежедневно 10 л воды первого контура активность атмосферного воздуха надреакторных помещений увеличивается на 790 Бк.

Выводы

В статье приведены данные о суточном загрязнении атмосферы реакторных помещений тритием при максимально возможной удельной активности. Радиационная обстановка при максимальной концентрации суточного загрязнения будет меньше допустимых НРБУ-97 пределов

и в целом генерация трития не приведет к серьезным загрязнениям атмосферы реакторных помещений. Этот эффект будет иметь еще меньшее значение в связи с тем, что согласно регламенту обеспечения радиационной безопасности одним из первых мероприятий новой смены является включение спецвентиляции.

Список использованной литературы

1. **Левин В. И.** Получение радиоактивных изотопов : [техническая литература] / Валентин Ильич Левин. — М.: Атомиздат, 1972. — 256 с.
2. **Барабанов С. А.** Основы радиационной безопасности / С. А. Барабанов, П. И. Залевский, П. А. Пономаренко. — Военно-морской флот, 1973.

3. **Гордеев И. В.** Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов / И. В. Гордеев, Д. А. Кардашев, А. В. Малышев. — М. : Изд-во государственного комитета Совета министров СССР по использованию атомной энергии, 1960.

4. **Бартоломей Г. Г.** Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов / Г. Г. Бартоломей, Г. А. Бать, В. Д. Байбаков, М. С. Алхутов. — М. : Энергоатомиздат, 1989. — 512 с.

5. **Определение нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора ИР-100** : Отчет о научно-исследовательской работе / СНУЯЭиП. — Севастополь, 2003.

6. **Нормы радиационной безопасности Украины (НРБУ-97).** Государственные гигиенические нормативы. — К. : Отдел полиграфии Укр. центра Госсанэпиднадзора Мин-ва здравоохранения Украины, 1998. — 134 с.

Получено 18.07.2012.