

УДК 621.039.55

ОПЕРАТИВНЫЙ УЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИИ ^3He В БЕРИЛЛИЕВЫХ БЛОКАХ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ЗАГРУЗКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА С БЕРИЛЛИЕВЫМ ЗАМЕДЛИТЕЛЕМ

© 2021 г. П. А. Зайченко^{1,*}, А. П. Малков¹, Д. В. Фомин¹, Е. С. Фомина¹

¹Дмитровградский инженерно-технологический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”, Дмитровград, 433511, Россия

*e-mail: zaychenko.p.a@mail.ru

Поступила в редакцию 12.04.2021 г.

После доработки 29.04.2021 г.

Принята к публикации 30.04.2021 г.

В работе описано влияние процесса изменения концентрации ^3He в бериллиевой кладке активной зоны на запас реактивности в ходе различных кампаний на примере реактора МИР [1]. Представлен алгоритм оперативного расчета концентраций ^3He в бериллиевых блоках кладки активной зоны с учетом фактического распределения энерговыделения по ячейкам рабочих каналов с ТВС, времени работы на мощности и времени остановок между кампаниями для перегрузки реактора. Выполнен анализ фактических показателей работы реактора в кампаниях, близких по продолжительности работы на мощности и по загрузке петлевых каналов, но отличающихся различным временем стоянки реактора между кампаниями. Благодаря исследованию и анализу экспериментальных данных по работе реактора в различных по длительности кампаниях выявлены их характерные закономерности. В ходе проведенных исследований произведена оценка влияния накопленного гелия на реактивные параметры реактора. В свою очередь, это позволило спрогнозировать характер изменения запаса реактивности при работе на мощности в зависимости от длительности стоянки. Дополнительно в статье приведено описание негативного влияния ядер-отравителей на состояние бериллиевых блоков в серии из краткосрочных кампаний, особенностью которых является превышение времени подготовки к кампании над длительностью самой кампании. Показано, что в серии краткосрочных кампаний ^3He накапливается от кампании к кампании, что неизбежно приводит к снижению запаса реактивности. При длительной работе на мощности определено, что данный поглощающий нуклид выступает в качестве выгорающего поглотителя нейтронов, замедляя темп потери запаса реактивности.

Ключевые слова: исследовательский реактор, активная зона, бериллий, отравление, реактивность

DOI: 10.1134/S2304487X21020139

ВВЕДЕНИЕ

Основное назначение материаловедческого исследовательского реактора – проведение испытаний тепловыделяющих элементов и сборок эксплуатируемых и проектируемых ядерных реакторов различного назначения в режимах, близких по своим параметрам к планируемым рабочим. В качестве замедлителя как правило используется вода или бериллий. Применение в качестве замедлителя бериллия во много предопределяет основные физические характеристики реактора.

Загрузка активной зоны должна быть сформирована таким образом, чтобы кроме согласования режимов облучения экспериментальных устройств, был обеспечен необходимый запас реактивности

для работы реактора в течение кампании, выполнены требования ядерной безопасности. Во многом эта задача решается путем эксплуатации реактора в режиме частичных перегрузок.

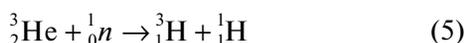
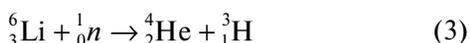
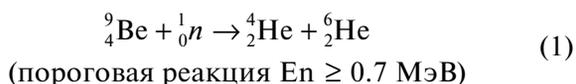
При разработке предложений по компоновке активной зоны в предстоящую кампанию один из факторов, учет которого необходим – оценка состояния бериллиевой кладки на требуемый момент времени.

Под воздействием нейтронного излучения в бериллиевой кладке активной зоны и отражателя реактора происходят реакции, приводящие к накоплению в нем нуклидов ^3He , ^4He , ^3H , ^6Li [2, 3]. Кроме снижения механической прочности блоков за счет накопления газообразных продуктов

реакции, ядра (ядра-отравители) ^6Li и ^3He обладают, большим сечением захвата тепловых нейтронов — $940 \cdot 10^{-28} \text{ м}^{-2}$ и $5327 \cdot 10^{-28} \text{ м}^{-2}$, соответственно. Накопление в твердом замедлителе реактора поглотителя нейтронов (отравление бериллия) влечет за собой изменение важнейших физических характеристик: запаса реактивности, эффективности органов СУЗ, эффектов реактивности [4].

В связи с тем, что отношение мощностей рабочих каналов, находящихся в различных областях активной зоны, может изменяться в десятки раз в ходе конкретной кампании, скорости накопления продуктов ядерных реакций в бериллиевых блоках, расположенных в различных областях активной зоны, существенно отличаются друг от друга.

Разработанный алгоритм [5] учета накопления ядер-отравителей позволяет оперативно получать информацию о состоянии бериллиевых блоков на любой момент времени работы реактора. В основу алгоритма положена следующая цепочка реакций:



Стоит отметить, что как правило после второго года работы реактора с циклическим графиком мощности (цикл состоит из ~ 21 суток работы на мощности 40 МВт и 8 суток остановки для перегрузки активной зоны; трижды в год цикличность нарушается остановкой на плановый предупредительный ремонт (ППР) и химическую отмывку теплообменного оборудования длительностью от двух недель до полутора месяцев) ядерная концентрация ^6Li в бериллии практически выходит на насыщение и в дальнейшем не меняется [6]. Концентрация ^3He с каждым годом увеличивается, причем ее значение существенно возрастает за время остановки реактора вследствие распада ^3H и снижается после его выхода на мощность. Количество накопленного за остановку ^3He зависит от длительности остановки и от времени эксплуатации бериллия.

Исходя из этого приобретает актуальность, с точки зрения влияния на нейтронно-физические характеристики реактора, учет отравления бериллиевых блоков ^3He .

ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ЯДЕР ОТРАВИТЕЛЕЙ НА НЕЙТРОННО ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Вследствие того, что реактор работает в режиме частичных перегрузок, с целью обеспечения текущих режимов облучения различных экспериментальных устройств, каждая компоновка активной зоны отличается друг от друга. Поэтому проведение экспериментальной оценки влияния отравления бериллия на реактивностные характеристики реактора представляет трудновыполнимую задачу.

С другой стороны, на примере анализа отдельных кампаний возможно оценить влияния убыли ^3He за счет захвата нейтронов на темп снижения запаса реактивности, что хорошо иллюстрируется на примере первой и последующей кампании реактора после длительной стоянки реактора, обусловленной проведением ППР или химической отмывки теплообменников. Если проанализировать именно те кампании, в которых загрузка петлевых каналов не изменялась в течение первых двух кампаний после длительной стоянки и имеющих идентичный уровень мощности, то становится возможным оценить влияние данного эффекта на запас реактивности.

Концентрация ^3He с каждым годом увеличивается, причем ее значение существенно возрастает за время остановки реактора вследствие распада ^3H и снижается после выхода на мощность (рис. 1).

Количество накопленного за остановку ^3He зависит от длительности остановки и от времени эксплуатации бериллиевого блока. График, представленный на рис. 1, описывает:

- изменение концентрации ^3He при работе реактора эксплуатация реактора во время серии кампаний, время подготовки к которым было больше или сравнимо с временем работы на мощности в эти кампании (1–2), (7–8) и (14–...);
- разотравление за счет убыли ^3He в кампанию (2–3) и (4–5);
- накопление гелия при подготовке к кампании (3–4);
- накопление гелия во время проведения химической отмывки теплообменников (6–7) и (9–10);
- убыль ^3He при работе на мощности после завершения химической отмывки теплообменников (10–11);
- накопление ^3He за время проведения ППР (12–13) с последующей убылью (13–14) при работе на мощности.

Исходя из рис. 1, целесообразнее проанализировать работу реактора после проведения ППР, химической отмывки теплообменников и серии краткосрочных экспериментов. Анализ кампа-

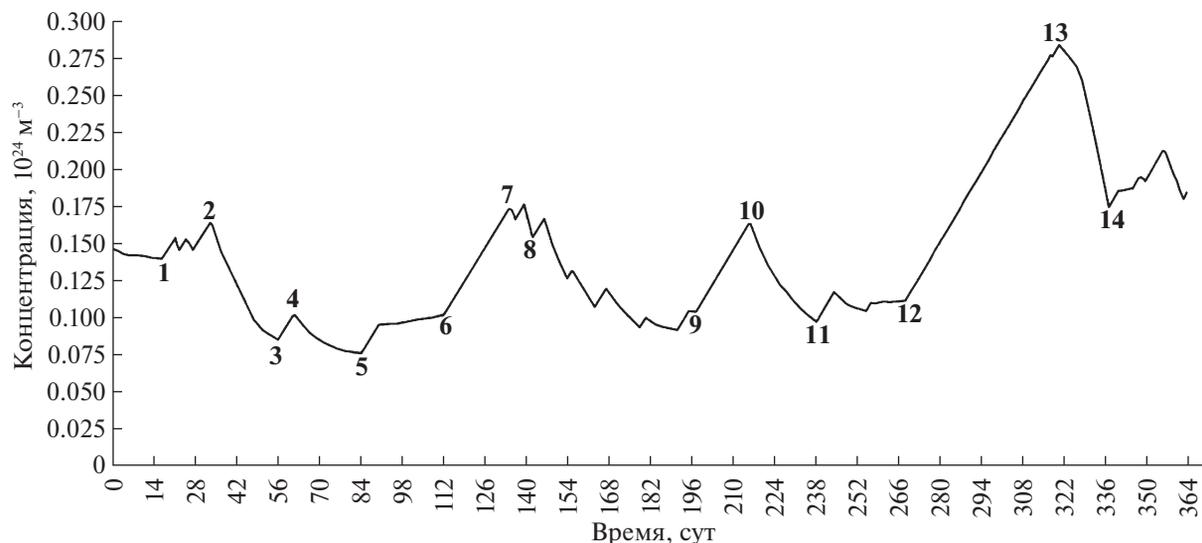


Рис. 1. Изменение средней по активной зоне концентрации ^3He в течение 2019–2020 гг.

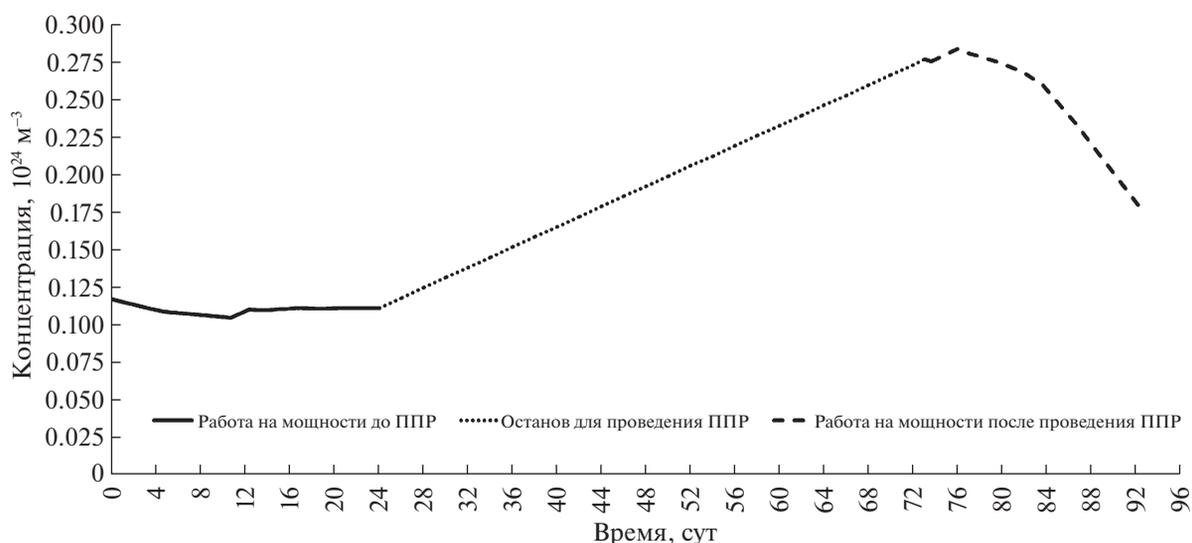


Рис. 2. Изменение средней по активной зоне концентрации ^3He во время проведения ППР.

ний после проведения перегрузки активной зоны неинформативен в виду небольшого времени стоянки (менее недели).

На исследовательских реакторах не менее одного раза в год проводится ППР. За это время вследствие распада трития (4) образуется значительное количество гелия. На рис. 2 продемонстрировано изменение концентрации ^3He при стоянке реактора на протяжении 49 дней.

Из рис. 2 видно, что при работе на мощности, концентрация ^3He убывала (отрезок времени до 24 суток). Затем реактор был остановлен (проме-

жуток до ~ 72 сут.) для проведения ППР, за время которого концентрация гелия увеличилась ~ 2.2 раза. После выхода на мощность, за счет взаимодействия с нейтронами, концентрация ^3He начинает снижаться.

Аналогичная картина наблюдается при проведении химической отмывки теплообменного оборудования, длительность которого в среднем занимает около двух недель (рис. 3, 4).

На рис. 3 пунктирная часть кривой отображает изменение средней концентрации гелия по активной зоне за время проведения химической

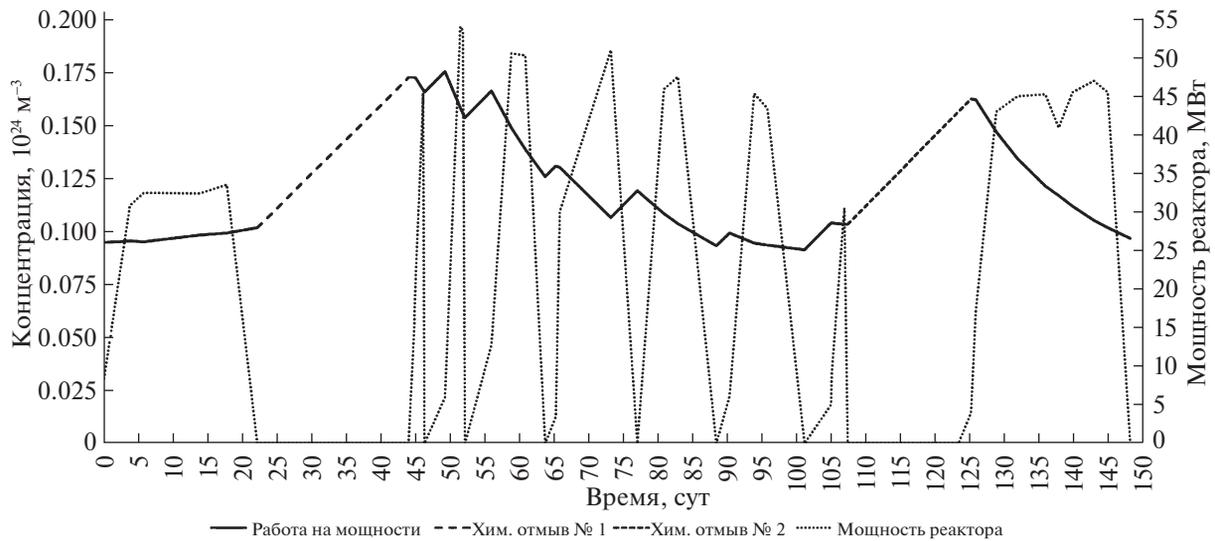


Рис. 3. Изменение средней по активной зоне концентрации ^3He во время проведения химической отмывки теплообменного оборудования в 2020 г.

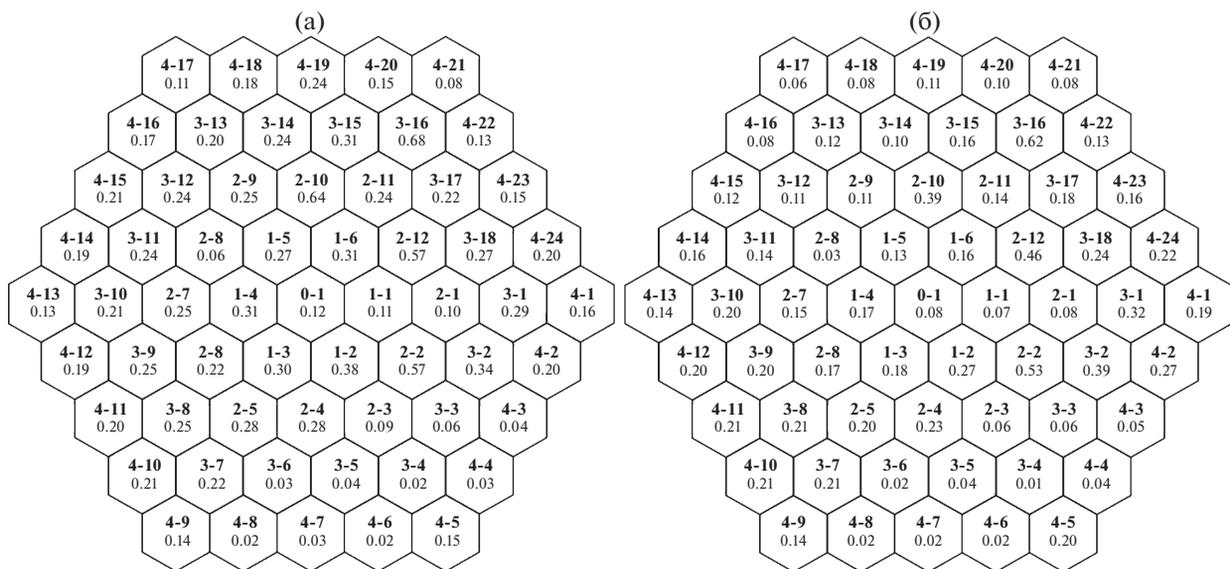


Рис. 4. Картограмма расчетных значений концентраций ^3He (10^{24} м^{-3}) в ячейках активной зоны реактора после серии краткосрочных кампаний (а) и завершения хим. отмыва (б).

отмывки теплообменного оборудования (хим. отмыв № 1 и № 2). Видно, что начальная концентрация перед остановом реактора в обоих случаях примерно одинакова ($0.102 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ и $0.103 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ соответственно). В обоих случаях динамика накопления ^3He идентична за исключением значения концентрации ^3He перед началом следующей кампании — после хим. отмыва № 1 она составила $0.172 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$, а после хим. отмыва

№ 2 — $0.162 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Это обусловлено длительностью останова — в первом случае она составила около 22 суток, а во втором — 18 суток.

Из рис. 4 видно, что концентрация ^3He в бериллиевых блоках после проведения краткосрочных кампаний в большинстве ячеек активной зоны близко по своим значениям к концентрации гелия после завершения химической отмывки. По этой причине кампании, следующие после хим. отмыва, и серии краткосрочных экспери-

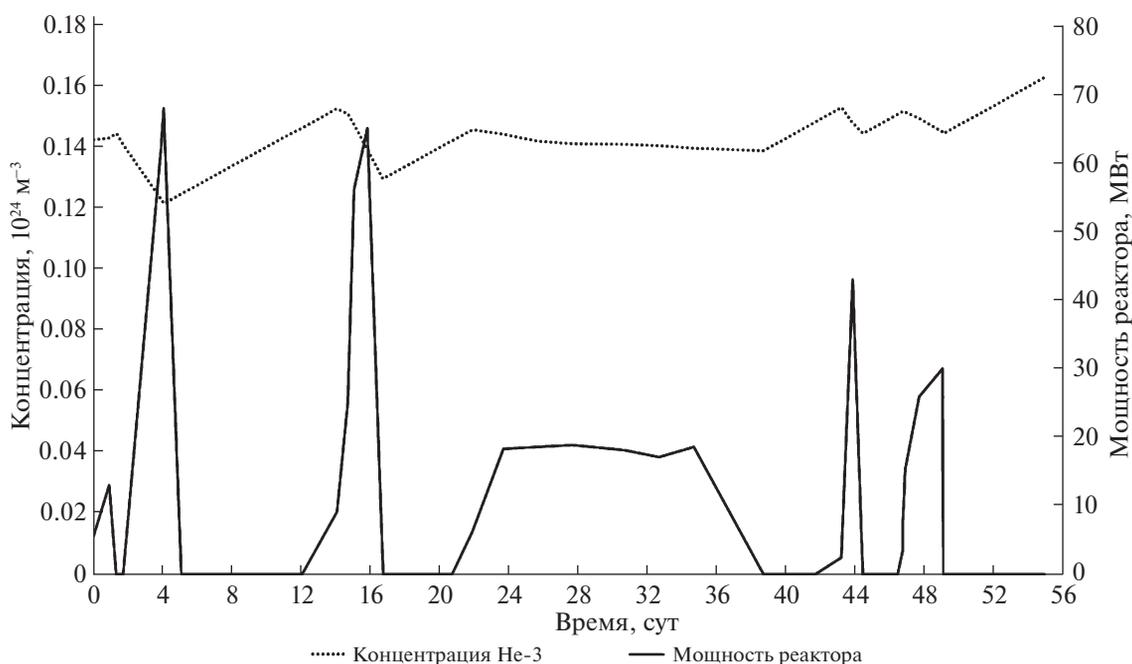


Рис. 5. Изменение средней по активной зоне концентрации ${}^3\text{He}$ во время проведения краткосрочных кампаний в 2019 г.

ментов можно рассматривать как схожие с точки зрения накопления ${}^3\text{He}$.

График работы исследовательского реактора допускает случаи, в которых на реакторе может быть проведено несколько краткосрочных кампаний. Отличительной особенностью данных кампаний являлась большая мощность (до ~ 70 МВт) и короткое время работы по сравнению с длительностью подготовки к кампании. Примером этому может являться кампания (временной промежуток с 14 по 17 сутки на рис. 5), когда время, затраченное на перегрузку активной зоны, составило порядка 10 суток против ~ 2.7 суток работы на мощности.

Если анализировать представленный на рис. 5 промежуток времени, с каждой последующей кампанией концентрация гелия возрастает. В промежуток времени с ~ 21 по 35 сутки реактор работал на относительно небольшой мощности (~ 18.3 МВт) по сравнению с другими кампаниями в рассматриваемом диапазоне. За две недели работы реактора на указанной мощности концентрация ${}^3\text{He}$ снизилась примерно на 5% за кампанию.

По завершению данной серии экспериментов для компенсации отрицательного эффекта от выгорания топлива и накопления ${}^3\text{He}$ в активной зоне наиболее выгоревшие ТВС были заменены на свежие. После проведения перегрузки реактор

проработал на протяжении трех недель (рис. 1, отрезок 2-3).

На рис. 6 представлены графики зависимостей мощности и запаса реактивности от времени для двух следующих друг за другом кампаний.

Как видно из рис. 6 (левая группа кривых), за время кампании произошло разотравление бериллиевой кладки активной зоны. В эту кампанию по результатам проведенной экспериментальной оценки эффективности РО СУЗ запас реактивности и запас реактивности перед остановкой реактора, составил $15.52\beta_{\text{эфф}}$ и $11.07\beta_{\text{эфф}}$ соответственно. Следующая кампания, начавшаяся с 23 января 2020 года, отличалась от предыдущей большим (на 23%) средним выгоранием топлива в активной зоне. Начальный запас реактивности составил $18.43\beta_{\text{эфф}}$, а запас реактивности перед остановкой реактора $7.27\beta_{\text{эфф}}$.

Таким образом, при одинаковой продолжительности работы на мощности, убыль запаса реактивности в первую кампанию составила $4.45\beta_{\text{эфф}}$, во вторую — $11.16\beta_{\text{эфф}}$. Следовательно, темп потери реактивности за счет убыли гелия в первом случае замедлен примерно в 2.5 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен оперативный алгоритм расчета концентраций нуклидов, образующихся в бериллиевых блоках замедлителя и обладающих

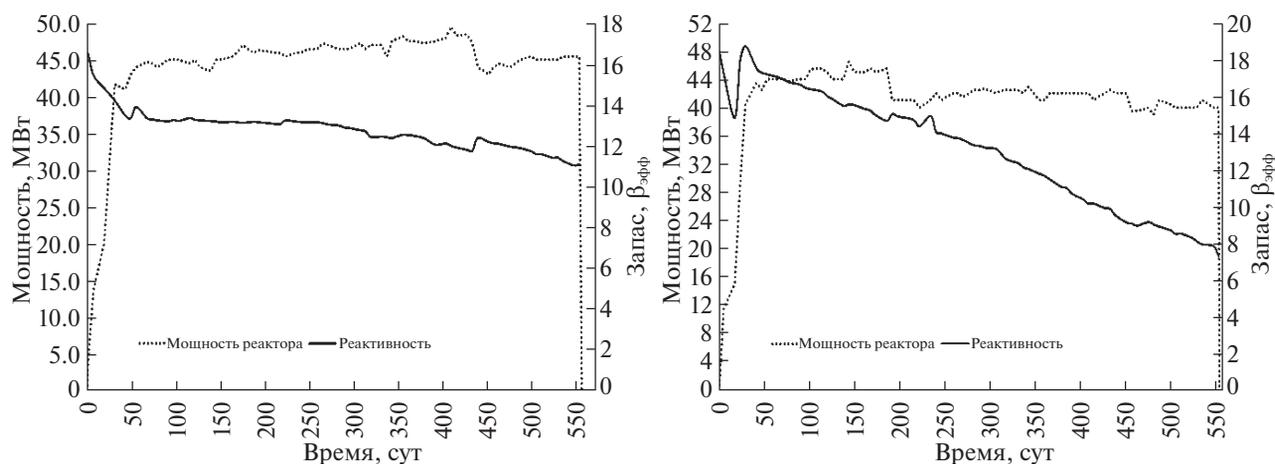


Рис. 6. Изменение мощности реактора и запаса реактивности для двух следующих друг за другом кампаний.

большим сечением захвата тепловых нейтронов. Показано, что с учетом динамики накопления наиболее важным для учета становится ^3He , как нуклид концентрация которого непосредственно зависит от времени останова и уровня мощности. В ходе анализа эксплуатации реактора в течение длительного времени установлено, что серия краткосрочных кампаний (независимо от уровня мощности) негативно сказывается на запасе реактивности за счет процесса накопления ^3He и может быть сравнима с остановкой реактора для проведения химической отмывки теплообменного оборудования. С опорой на экспериментальные данные показано, что при длительной работе на мощности ^3He выступает в качестве выгорающего поглотителя, замедляя темп потери реактивности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследовательские ядерные установки России / Под ред. Н.В. Архангельского, И.Т. Третьякова, В.Н. Федулina. М.: ОАО "НИКИЭТ", 2012. 330 с.
2. Бекурц К., Виртц К. Нейтронная физика. М.: Атомиздат, 1968. 456 с.
3. Малков А.П., Пименов В.В., Калыгин В.В., Козыльков А.В. Ядерно-физические процессы в бериллии под облучением и их влияние на физические и технологические характеристики исследовательских реакторов // Сборник трудов АО "ГНЦ НИИАР", 2016. № 1. С. 13–25.
4. Калыгин В.В., Малков А.П., Пименов В.В. Влияние накопления ^3He и ^6Li в бериллиевых блоках на нейтронно-физические характеристики реактора МИР // Атомная энергия. 2008. Т. 104. Вып. 2. С. 84–88.
5. Калыгин В.В., Малков А.П., Пименов В.В., Овчинников А.Б. Учет накопления ядер лития-6 и гелия-3 в бериллиевых блоках при определении нейтронно-физических характеристик реактора "МИР". Известия высших учебных заведений // Ядерная энергетика. 2008. № 3. С. 31–37.
6. Анисимков О.В., Калыгин В.В., Малков А.П., Пименов В.В. Влияние отравления бериллия на нейтронно-физические характеристики реактора МИР // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерная техника и технология. 1993. Вып. 1. С. 49–52.

Vestnik Nacional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta "MIFI", 2021, vol. 10, no. 2, pp. 176–182

Operational Accounting of the Concentration of ^3He in Beryllium Blocks During the Formation of the Core Loading of a Research Reactor with a Beryllium Moderator

P. A. Zaichenko^{a,#}, A. P. Malkov^a, D. V. Fomin^a, and E. S. Fomina^a

^a Dimitrovgrad Engineering and Technological Institute of the National Research Nuclear University MEPhI, Dimitrovgrad, Ulyanovskaya oblast, 433511 Russia

[#]e-mail: zaichenko.p.a@mail.ru

Received April 12, 2021; revised April 29, 2021; accepted April 30, 2021

Abstract—The influence of change in the ^3He concentration in the beryllium core masonry on the reactivity margin during various campaigns has been described using the MIR reactor as an example. An algorithm is

presented for the on-line calculation of ^3He concentrations in beryllium blocks of the core masonry, taking into account the actual distribution of the energy release over the cells of the working channels with fuel assemblies, the operating time at power, and the time of shutdowns between campaigns for refueling the reactor. The analysis of the actual performance of the reactor in the campaigns, which are close in terms of the duration of operation at power and in the loading of the loop channels but differing in times of the reactor stopping between the campaigns, is carried out. Through the study and analysis of experimental data on the operation of the reactor in campaigns of various durations, their characteristic properties have been revealed. The effect of the accumulated helium on the reactivity parameters of the reactor has been estimated. The nature of changes in the reactivity margin when operating at power, depending on the duration of the stay has been predicted using this estimate. In addition, the negative impact of poisoning nuclei on the state of beryllium blocks in a series of short-term campaigns, a feature of which is the excess of the preparation time for the campaign over the duration of the campaign itself, has been described. It has been shown that ^3He accumulates from campaign to campaign in a series of short-term campaigns, which inevitably leads to a decrease in the reactivity margin. During long-term operation at power, it has been found that this absorbing nuclide acts as a burnable absorber of neutrons, reducing the rate of loss of the reactivity margin.

Keywords: research reactor, core, beryllium, poisoning, reactivity

DOI: 10.1134/S2304487X21020139

REFERENCES

1. *Issledovatel'skie yadernye ustanovki Rossii* [Russian nuclear research facilities] (N.V. Arhangel'skogo, I.T. Tret'yakova, V.N. Fedulina eds.), Moscow, OAO "NIKIET", 2012, 330 p.
2. Bekurc K., Virtc K., *Nejtronnaya fizika* [Neutron physics], Moscow, Atomizdat, 1968, 456 p.
3. Malkov A.P., Pimenov V.V., Kalygin V.V., Kozylov A.V., *Iaderno-fizicheskie protsessy v berillii pod oblucheniem i ikh vliianie na fizicheskie i tekhnologicheskie karakteristiki issledovatel'skikh reaktorov* [Nuclear processes in beryllium under irradiation and their effect on physical and technological characteristics of research reactors], Sbornik trudov AO "GNTC NIIAR", 2016, no. 1, pp. 13–25.
4. Kalygin V.V., Malkov A.P., Pimenov V.V., Vliyanie nakopleniya ^3He i ^6Li v berillievyykh blokah na nejtronnofizicheskie karakteristiki reaktora MIR [Influence of the accumulation of ^3He and ^6Li in beryllium blocks on the neutron-physical characteristics of the MIR reactor], *Atomnaya energiya*, 2008, vol. 104, no. 2, pp. 84–88.
5. Kalygin V.V., Malkov A.P., Pimenov V.V., Ovchinnikov A.B., Uchet nakopleniya yader litiya-6 i geliya-3 v berillievyykh blokah pri opredelenii nejtronnofizicheskikh karakteristik reaktora "MIR" [Accounting for the accumulation of lithium-6 and helium-3 nuclei in beryllium blocks when determining the neutron-physical characteristics of the MIR reactor], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. YAdernaya energetika*, 2008, no. 3, pp. 31–37.
6. Anisimkov O.V., Kalygin V.V., Malkov A.P., Pimenov V.V., Vliianie otravleniya berillia na nejtronnofizicheskie karakteristiki reaktora MIR [Effect of beryllium poisoning on the MIR reactor neutronic parameters], *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Iadernaia tekhnika i tekhnologiya*, 1993, vol. 1, pp. 49–52.