

ЯДЕРНАЯ, РАДИАЦИОННАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

NUCLEAR, RADIATION AND ENVIRONMENTAL SAFETY

<https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-01>

УДК 621.039.56

EDN BDGKTE

Оригинальная статья / Original paper



Особенности практической реализации обеспечения безопасности реакторов ВВЭР

Д.Н. Гончаров, П.В. Кащенко, Д.С. Колотушкин  

Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж,
Воронежская обл., Российская Федерация

 KolotushkinDS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Резюме. В статье рассматривается проблема обеспечения ядерной безопасности реакторов ВВЭР, связанная с выгоранием изотопа бора-10 (^{10}B) в теплоносителе первого контура. Традиционно для контроля реактивности и поддержания подкритичности используется раствор борной кислоты, при этом в проектных расчетах принимается постоянная атомная доля ^{10}B (19,8%). Авторы обосновывают, что данное допущение является некорректным: вследствие поглощения нейтронов содержание ^{10}B снижается к концу топливной кампании на 5,6–7,3%, а исходное обогащение партий борной кислоты варьируется от 19,6% до 20,8%. На основе эксплуатационных данных энергоблоков №1 НВАЭС-2 (ВВЭР-1200) и №4 НВАЭС (ВВЭР-440), а также расчетов по программам БИПР-7А и ПЕРМАК-А выполнено математическое моделирование изменения концентрации поглотителя. Показано, что игнорирование эффекта выгорания приводит к расхождению между прогнозируемой и фактической концентрацией борной кислоты (до 0,4 г/дм³ за кампанию) и создает неучтенный запас или дефицит реактивности. Для новых поколений ВВЭР данная проблема усугубляется увеличением мощности, длительности кампаний и внедрением рециклинга теплоносителя. Сформулированы предложения по изменению подхода к нормированию жидкого поглотителя: предлагается перейти от установления пределов по массовой концентрации борной кислоты как химического вещества к иерархической системе контроля массовых концентраций именно изотопа-поглотителя ^{10}B во всех заполняемых системах. Предлагается внедрение прямого контроля методом нейтронно-абсорбционной спектрометрии без пересчета в химическую концентрацию, разделение нормативов для систем безопасности (нижний предел по ^{10}B) и водно-химического режима (верхний предел по H_3BO_3), а также учет изотопного состава в имитационных расчетах управления реактивностью.

Ключевые слова: ядерная безопасность, ВВЭР, борная кислота, изотоп ^{10}B , выгорание поглотителя, глубоководная защита, первый контур, реактивность, критическая концентрация, водно-химический режим.

Для цитирования: Гончаров Д.Н., Кащенко П.В., Колотушкин Д.С. Особенности практической реализации обеспечения безопасности реакторов ВВЭР. *Глобальная ядерная безопасность*. 2026;16(3):5-16. <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-01>

For citation: Goncharov D.N., Kashchenko P.V., Kolotushkin D.S. Key features of the safe operation of VVER reactors in practice. *Nuclear Safety*. 2026;16(3):5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.26583/gns-2026-03-01>

Key features of the safe operation of VVER reactors in practice

Daniil N. Goncharov, Pavel V. Kashchenko, Dmitrii S. Kolotushkin  

Novovoronezh NPP the branch of JSC «Rosenergoatom Concern», Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation

 KolotushkinDS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Abstract. This article considers the issue of ensuring the nuclear safety of VVER reactors related to the burn-up of the boron-10 (^{10}B) isotope in the primary coolant. Traditionally, a boric acid solution is used to control reactivity and maintain subcriticality, while design calculations assume a constant atomic fraction of ^{10}B (19.8 %). The authors explain why this assumption is incorrect. As a result of neutron absorption, the ^{10}B content decreases by 5.6–7.3 %

by the end of the fuel cycle, while the initial enrichment of the boric acid batches varies between 19.6 per cent and 20.8 %. Based on operational data of power units No. 1 at Novovoronezh NPP-2 (VVER-1200) and No. 4 at Novovoronezh NPP (VVER-440), as well as calculations using the BIPR-7A and PERMAK-A programmes, a mathematical model of the change in absorber concentration has been developed. The study shows that ignoring the burn-out effect leads to a discrepancy between the predicted and actual boric acid concentration (up to 0.4 g/dm³ per campaign) and results in an unaccounted-for surplus or deficit in reactivity. This problem is compounded for new generations of VVER reactors by increased power output, longer operating campaigns and the introduction of coolant recycling. Proposals are made to change the approach to regulating liquid absorbers. It is recommended to move away from setting limits on the mass concentration of boric acid as a chemical substance towards a hierarchical system for monitoring the mass concentrations of the ¹⁰B absorber isotope specifically in all filled systems. It is proposed to introduce direct monitoring using neutron absorption spectrometry without conversion to chemical concentration, to separate the regulatory limits for safety systems (lower limit for ¹⁰B) and the water-chemical regime (upper limit for H₃BO₃), as well as taking the isotopic composition into account in simulation calculations for reactivity control.

Keywords: nuclear safety, VVER, boric acid, ¹⁰B isotope, moderator burn-up, defence-in-depth, primary circuit, reactivity, critical concentration, water chemistry

Вопросы ядерной безопасности ВВЭР всегда находятся в приоритете внимания, как эксплуатирующей организации, так и надзорных органов, поэтому подвергаются периодической ревизии при эксплуатации АЭС. Переоценка вопросов безопасности выполняется как с точки зрения современного развития науки и техники, так и накопленных знаний и опыта по эксплуатации реакторной установки.

Согласно «Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций» НП-001-15, безопасность АЭС должна обеспечиваться за счет последовательной реализации концепции глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ), основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду, и системы технических и организационных мер по защите барьеров и сохранению их эффективности. Для направления разработчиков проекта реакторной установки (РУ) и АЭС с целью создания эффективной ГЭЗ в НП-001-15 определены основные функции безопасности АЭС.

Для обеспечения ядерной безопасности при проектировании и эксплуатации АЭС основополагающими являются следующие функции безопасности: аварийный останов реактора и поддержание его в подкритическом состоянии, обеспечение подкритичности при хранении и транспортировании ядерного топлива. Для реализации данных функций в зависимости от условий эксплуатации, как правило, используются две

системы управления и защиты (СУЗ) реактора, реализованные с учетом принципа разнообразия – жидкостная и механическая. К механической СУЗ относят органы регулирования – сборки поглощающих стержней с наполнителем из карбида бора (ОР СУЗ). К жидкостной СУЗ относят систему подачи раствора борной кислоты (РБК) в теплоноситель 1 контура. Основным нуклидом-поглотителем нейтронов, выбранным для проектов ВВЭР, является изотоп-поглотитель ¹⁰B, который входит в состав борной кислоты, растворенной в теплоносителе 1 контура и подаваемой для контроля и управления за цепной реакцией деления с помощью жидкостной СУЗ. Для сравнения: сечение поглощения нейтронов ¹⁰B – 3838 барн, ¹¹B – 10 барн (0,025 эВ).

В проектах реакторных установок ВВЭР борная кислота определяет следующие важные аспекты:

- ядерная безопасность: борная кислота применяется как жидкий поглотитель нейтронов, поэтому является инструментом воздействия на реактивность активной зоны, средством регулирования мощности РУ, обеспечения требуемой подкритичности для остановленного реактора;

- водно-химический режим (ВХР) 1 контура: борная кислота способствует повышению коррозионного потенциала на границе среды и металла оборудования, при этом измерения текущей концентрации борной кислоты, как химического элемента, необходимо для координирования ее с концентрациями корректирующих щелочных реагентов,

подаваемых в первый контур;

– использование установленной мощности: равенство расчетной и фактической длительности кампании реактора говорит об эффективности использования ядерного топлива, т.к. график планового предупредительного ремонта выстраивается из расчетной прогнозной длительности.

Несмотря на то, что эффективность борной кислоты определяется в её составе атомной долей изотопа-поглотителя ^{10}B в смеси изотопов $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$, на практике для ВВЭР устанавливаются пределы безопасной эксплуатации (ПБЭ), связанные с нейтронно-физическими расчетами по концентрации именно борной кислоты, как химического вещества. При этом постулируется постоянство атомной доли изотопа-поглотителя ^{10}B во всех заполняемых системах 1 контура в течение всей кампании реактора. В физической части проекта для активной зоны энергоблоков ВВЭР и для расчетов, выполненных в обоснование безопасности выполнения основных функций безопасности, принята доля нуклида-поглотителя ^{10}B равная 19,8% по отношению ко всему бору, содержащемуся в борной кислоте. ПБЭ по массовой концентрации нуклида-поглотителя ^{10}B не установлены.

В соответствии с требованиями НП-082-07 проектом энергоблока АЭС предусмотрены технические средства контроля содержания нуклида-поглотителя нейтронов в теплоносителе 1 контура, а также в средах, подаваемых в первый контур (в том числе емкостях аварийного запаса борной кислоты, являющихся частью жидкостной СУЗ) в процессе эксплуатации РУ.

Для этих целей на АЭС реализован лабораторный химический анализ (ЛХА) проб и нейтронные анализаторы раствора бора типа НАР-12М (НАР-12М). В первом случае измеряется содержание ^{10}B и при постулированном содержании ^{10}B в борной кислоте 19,8% с помощью фиксированного переводного коэффициента рассчитывается концентрация борной кислоты, растворенная в отобранной для измерения среде. Во втором случае при заданной функции источника нейтронов, размещенного в НАР-12М, измеряется уменьшение потока нейтронов при

прохождении измеряемой среды с борной кислотой через НАР-12М. Оба эти метода не способны учесть возможное разное содержание доли ^{10}B в борной кислоте, при этом во втором методе существует возможность изменения настроечного коэффициента пересчета из ^{10}B в борную кислоту. Результаты измерений концентрации борной кислоты, полученные при ЛХА, определены в качестве арбитражных и используются в имитационных расчетах. Оценка неопределенности для ПБЭ, связанных с концентрацией жидкого поглотителя в проектах не приводится.

Так для реакторов, где перегрузка ядерного топлива осуществляется с расщеплением ОР СУЗ и реактивность компенсируется раствором жидкого поглотителя, концентрация раствора жидкого поглотителя должна быть доведена до значения, при котором (с учетом возможных ошибок) обеспечивается подкритичность реактора не менее 0,02 (без учета введенных рабочих ОР СУЗ). Для режимов с перегрузкой топлива на реакторах ВВЭР установлены следующие ПБЭ: ВВЭР-440 12 г/дм³, ВВЭР-1000 16 г/дм³, ВВЭР-1200 17 г/дм³.

При пуске энергоблока подкритичность в любой момент кампании реактора после взведения ОР СУЗ аварийной защиты (АЗ) в рабочее положение с введенными в активную зону остальными ОР СУЗ должна быть не менее 0,01. Указанная подкритичность вычисляется с помощью расчетных программ для фактического состояния активной зоны и момента кампании реактора.

Описанный проектный подход по установлению ПБЭ по концентрации борной кислоты имеет существенный недостаток, поскольку доля ^{10}B не является константой и выгорает в результате ядерной реакции в процессе работы РУ. Вследствие реакции ^{10}B с нейтронами его процентное содержание в сумме изотопов бора уменьшается, что необходимо учитывать. Также немаловажно учитывать и второй фактор, содержание ^{10}B в борной кислоте в поставляемых на АЭС партиях может варьироваться от 19,6 % до 20,8 %, отсекающим критерием при входном контроле партии на АЭС принято содержание ^{10}B не менее 19,6 %.

Эффект выгорания нуклида поглотителя ^{10}B давно известен и рассматривался разными группами авторов. В статье [1] выполнялась корректировка расчетных кодов для реакторов CNP1000 для учета эффекта выгорания изотопа ^{10}B с целью снижения ошибки прогнозирования критической концентрации борной кислоты и расчетной длительности борной кампании. Также авторы указывают на необходимость учета разбавления в процессе эксплуатации теплоносителя 1 контура свежей борной кислотой, что может свести к минимуму все эффекты выгорания нуклида поглотителя. В источнике [2] рассмотрено применение масс-спектрометров для изучения сдвига изотопного соотношения $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ в теплоносителе 1 контура. Авторы в работе [3] выполняли исследования по выгоранию высокообогащенной борной кислоты для реакторов типа EPR.

Указанные эффекты также необходимо рассмотреть применительно к ВВЭР и практике установления ПБЭ. Вместе с тем, в проектах АЭС с ВВЭР новых поколений увеличивается взаимное влияние сдвига изотопного соотношения $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ в растворах борной кислоты в ходе кампании реактора на параметры эксплуатации. Этому способствуют следующие проектные изменения:

- 1) повышение номинальной тепловой мощности РУ;
- 2) увеличение продолжительности кампании реактора;
- 3) увеличение проектного срока службы РУ;
- 4) увеличение проектного коэффициента использования установленной мощности;
- 5) внедрение в практику проектирования более полного возврата в контур регенерированной борной кислоты для снижения количества жидких отходов;
- 6) внедрение режимов суточного маневрирования тепловой мощностью РУ;
- 7) перспективы перехода на новые виды ядерного топлива.

С обозначенной темой тесно связаны вопросы нормирования массовых концентраций изотопа-поглотителя ^{10}B в заполняемых системах 1 контура.

Вместе с тем практика российских АЭС закупать борную кислоту с долей ^{10}B 19,6 % (что меньше установленной в проекте доли на 0,2 %) и установление границ значений массовых концентраций ^{10}B , «пропорциональных концентрациям РБК» в баках запаса без установления жесткой взаимосвязи с самими концентрациями, не повышают консерватизма в обеспечении требуемой эффективности жидкого поглотителя. При этом нормативной документацией не допускается расхождений между информацией, установленной в проекте АЭС (в том числе в физической части проекта активной зоны) и информацией, приводимой в отчете по обоснованию безопасности АЭС.

Оценка выгорания изотопа ^{10}B на ВВЭР

Для оценки консервативности установленных в проектах ВВЭР эксплуатационных пределов и пределов безопасной эксплуатации была выполнена оценка степени выгорания ^{10}B в течение реальной кампании реактора на основе анализа эксплуатационных данных. Выполнена оценка влияния изотопного сдвига в растворах борной кислоты на обеспечение ядерной безопасности.

С целью расчета величин выгорания и изменения содержания ^{10}B в борной кислоте теплоносителя 1 контура и в теплоносителе, выведенном из 1 контура, в течение кампании реактора рассмотрим работу ВВЭР-1200 на примере энергоблока №1 Нововоронежской АЭС-2.

Борная кислота, компенсирующая реактивность активной зоны, циркулирует в первом контуре и практически не заменяется в течение кампании реактора (она только постепенно выводится на протяжении кампании). При проведении водообмена 1 контура теплоноситель сливается в баки системы хранения теплоносителя эксплуатационного качества и после прохождения концентрирования на выпарных аппаратах направляется в баки системы борного концентрата (при этом доля ^{10}B не увеличивается). При отсутствии неорганизованных протечек добавление свежеприготовленного раствора борной кислоты в теплоноситель 1 контура не требуется.

В источнике [4] рассмотрен вопрос о выгорании ^{10}B в течение кампании реактора и отмечено, что при длительности в 300 эфф. суток выгорание ^{10}B может достигнуть 10 % начального содержания и привести к снижению эффективности борной кислоты по реактивности. Там же приведено дифференциальное уравнение для описания изменения концентрации ядер ^{10}B в теплоносителе 1 контура:

$$dN/dt + \sigma_a \varphi N (T_{a.з.}/T_{\text{конт}}) + N_0/T_0 = 0$$

где N – концентрация ядер ^{10}B в теплоносителе, см^{-3} ;

N_0 – концентрация ядер ^{10}B в начале кампании реактора, см^{-3} ;

T_0 – полное время работы на номинальной мощности, эфф. сут;

σ_a – микроскопическое сечение поглощения ^{10}B , см^2 ;

φ – средняя плотность потока тепловых нейтронов в реакторе, $\text{н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;

$T_{a.з.}/T_{\text{конт}}$ – отношение времени прохождения единицы объема теплоносителя через активную зону реактора к времени прохождения того же объема через весь 1 контур, включая и активную зону реактора.

Согласно источнику [4] отношение $T_{a.з.}/T_{\text{конт}}$ можно приближенно принять равным $V_{a.з.}/V_{\text{ГЦК}}$, где $V_{a.з.}$ – объем теплоносителя в активной зоне реактора, а $V_{\text{ГЦК}}$ – объем циркулирующего теплоносителя 1 контура:

$$N/N_0 = \exp(-\sigma_a \varphi T_{a.з.} T / T_{\text{конт}}) - (T_{\text{конт}}/T_0 \sigma_a \times \varphi T_{a.з.}) [1 - \exp(-\sigma_a \varphi T_{a.з.} T / T_{\text{конт}})]$$

Расчеты значений N/N_0 по формуле из источника [4], являющейся решением вышеуказанного уравнения, дают нулевое значение N/N_0 до окончания кампании реактора и отрицательные значения в конце кампании реактора. Эти результаты соответствуют виду исходного дифференциального уравнения и не дают информации о выгорании и изменении содержания ^{10}B в боре в течение кампании реактора.

В данной статье расчетная оценка выгорания ^{10}B в теплоносителе 1 контура и изменения его содержания в теплоносителе, выведенном из 1 контура, выполнена на основе данных критических концентраций борной кислоты в течение 3-ей кампании реактора энергоблока № 1 НВАЭС-2 и 48-й кампании

энергоблока №4 НВАЭС, рассчитанных по программе БИПР-7А.

Изменение количества ^{10}B в теплоносителе 1 контура на коротком интервале времени (при постоянной плотности потока нейтронов) за счет выгорания можно описать следующими уравнениями (1)-(4):

$$\frac{dN}{dt} = -\sigma_a \varphi N(t) \frac{T_{a.з.}}{T_{\text{конт}}}, \quad (1)$$

$$\int_{N_0}^N \frac{dN(t)}{N(t)} = - \int_0^t \sigma_a \varphi \frac{T_{a.з.}}{T_{\text{конт}}} dt, \quad (2)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\sigma_a \varphi \frac{T_{a.з.}}{T_{\text{конт}}} t, \quad (3)$$

$$N = N_0 e^{-\sigma_a \varphi \frac{T_{a.з.}}{T_{\text{конт}}} t}. \quad (4)$$

Усредненное по спектру тепловых нейтронов микроскопическое сечение поглощения ^{10}B σ_a получено на основе формулы (5), приведенной в источнике [5]:

$$\sigma_a = \left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \right) \sqrt{\frac{293,6}{T_{\text{нг}}}} \sigma_a(V_0) \quad (5)$$

$T_{\text{нг}} = 590\text{K}$ – температура нейтронного газа оценена на основе формулы, указанной в источнике [6], где замедляющаяся способность среды $\xi \Sigma_s = 1,35 \text{ см}^{-1}$, макроскопическое сечение поглощения среды $\Sigma_a = 0,0112 \text{ см}^{-1}$, $T=310 \text{ }^\circ\text{C}$, выражение (6):

$$T_{\text{нг}} = T \left[1 + 1,4 \frac{\Sigma_a}{\xi \Sigma_s} \right] \quad (6)$$

Микроскопическое сечение реакции нейтронов с ^{10}B $\sigma_a(V_0) = 3838$ барн для стандартной скорости тепловых нейтронов $V_0 = 2200 \text{ м/с}$ взято из справочника [7].

Расчет выгорания изотопа ^{10}B в течение кампании реактора ВВЭР-1200

С помощью программы ПЕРМАК-А (версия 1.5) была рассчитана плотность потока тепловых нейтронов для третьей кампании реактора энергоблока №1 НВАЭС-2. Результаты расчетов и значение плотности потока тепловых нейтронов, принятое для проведения оценочных расчетов $\varphi \approx 4,43 \times 10^{13} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$, приведены в таблице 1. Использование интегрального значения плотности потока нейтронов приводит к дополнительной относительной погрешности оценки выгорания нуклида поглотителя в пределах 7% и не оказывает влияние на выводы, сделанные в настоящей статье.

Таблица 1. Плотность потока тепловых нейтронов по слоям активной зоны в различные моменты 3-й кампании энергоблока №1 НВАЭС-2 (ВВЭР-1200)**Table 1.** Thermal neutron flux density across the core layers at various points in time during the third campaign at Power Unit No. 1 of the Novovoronezh NPP-2 (VVER-1200)

Слой	$\Phi \cdot 10^{-13}$, н/см ² ·с (0 эфф. сут.)	$\Phi \cdot 10^{-13}$, н/см ² ·с (20 эфф. сут.)	$\Phi \cdot 10^{-13}$, н/см ² ·с (120 эфф. сут.)	$\Phi \cdot 10^{-13}$, н/см ² ·с (220 эфф. сут.)	$\Phi \cdot 10^{-13}$, н/см ² ·с (300 эфф. сут.)
1	1,98	2,13	2,58	2,37	2,84
5	4,04	4,02	4,50	5,32	5,54
10	5,11	4,96	5,11	5,74	5,68
15	5,42	5,18	5,08	5,55	5,44
20	5,48	5,20	4,89	5,37	5,28
25	5,38	5,12	4,77	5,22	5,19
30	5,16	4,96	4,72	5,11	5,12
35	4,84	4,73	4,60	5,03	5,10
40	4,39	4,39	4,45	4,94	5,13
45	3,57	3,66	3,97	4,22	4,85
50	1,76	1,9	2,28	2,06	2,35
Ср.зн.	4,28	4,20	4,27	4,63	4,77
Ср.зн.	4,43				

Расчет выгорания изотопа ^{10}B выполнялся по формуле (4) шагами с временным интервалом 1 эфф. сутки в течение кампании реактора. Значения параметров, используемых в формуле (4), приведены в таблице 2.

Таблица 2. Значения параметров, использованных в расчете выгорания изотопа ^{10}B по формуле (4) для ВВЭР-1200**Table 2.** Values of the parameters used in calculating the burn-up of the ^{10}B isotope using equation (4) for the VVER-1200

Параметр	Значение
$\overline{\sigma}_a$, см ²	2,397E-21
$\Phi \times t$, н/(см ²)	3,83E+18
$V_{a.z.}$, м ³	16,6
$V_{ГЦК}$, м ³	317

Значения критических концентраций борной кислоты при работе реактора энергоблока №1 НВ АЭС-2 с 3-ей топливной загрузкой на номинальной мощности с шагом 100 эффективных суток приведены в таблице 3.

Коэффициент пересчета концентрации ^{10}B в концентрации борной кислоты выбран, исходя из доли ^{10}B 19,8 % и равен 31,2 (взят из инструкции по эксплуатации НАР-12М).

По приведенным в таблице 3 данным путем интерполяции определялись значения концентраций борной кислоты и ^{10}B на каждые эффективные сутки. Расчеты изменения

концентрации ^{10}B в теплоносителе 1 контура выполнялись с учетом выгорания и выведения при подаче дистиллята для компенсации реактивности на каждые эфф. сутки «ступеньками» вплоть до 300 эфф. суток.

Таблица 3. Критические концентрации борной кислоты при работе энергоблока №1 НВАЭС-2 с 3-й топливной загрузкой на номинальной мощности**Table 3.** Critical concentrations of boric acid during operation of Power Unit No. 1 at the Novovoronezh NPP-2 with the third fuel load at rated power

Т, эфф. сут.	Св _{кп.} , г/кг
0.00	7.64
100.00	5.23
200.00	3.10
300.00	0,87

При расчетной длительности работы 3-ей топливной загрузки на номинальной мощности 338 эфф. суток расчет производился до 300 эфф. суток, так как из-за выгорания содержание ^{10}B в теплоносителе 1 контура стало равным нулю на 313 эфф. сутки.

На рисунке 1 показаны изменения концентрации ^{10}B в теплоносителе и выгорание ^{10}B во время работы реактора. Результаты расчетов показывают, что на 300 эфф. сутки количество выгоревшего ^{10}B оставляет 7,25% от его первоначального значения.

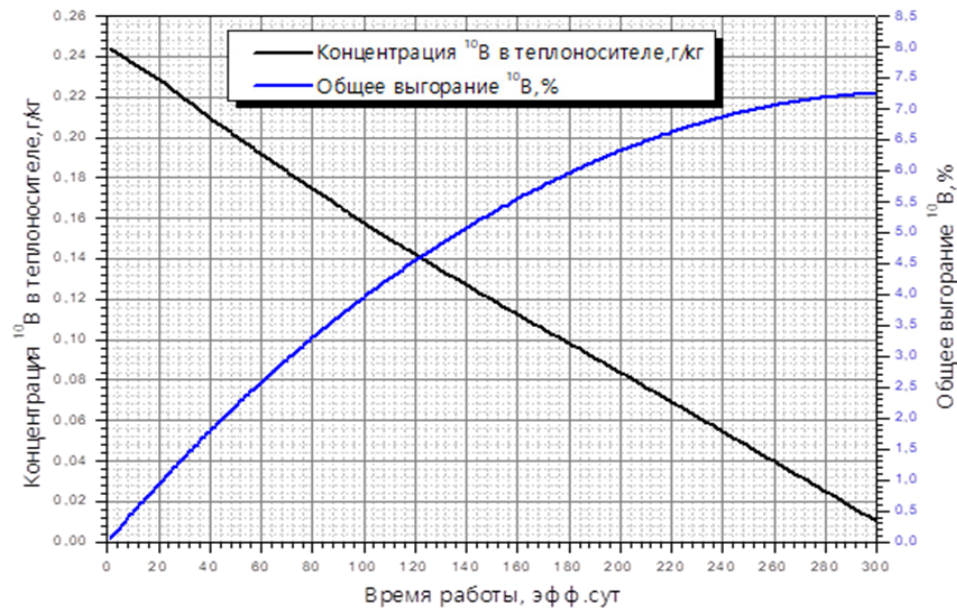


Рисунок 1. Зависимость концентрации ^{10}B в теплоносителе первого контура и его выгорания во время работы реактора

Figure 1. Relationship between the concentration of ^{10}B in the primary circuit coolant and its burnout during reactor operation

Оценка среднего значения доли ^{10}B в боре теплоносителя выведенного из первого контура

В данной работе также были проведены расчеты объема выведенного теплоносителя и изменения атомной доли ^{10}B от принятого первоначального значения 19,8% до значе-

ния, которое установится в объеме выведенного теплоносителя из 1 контура в течение кампании реактора до 300 эфф. суток. На 300 эфф. суток доля ^{10}B в боре составила 18,65 %, что на 5,8 % (относительных) меньше значения 19,8 %, принятого в расчетах (рис. 2).

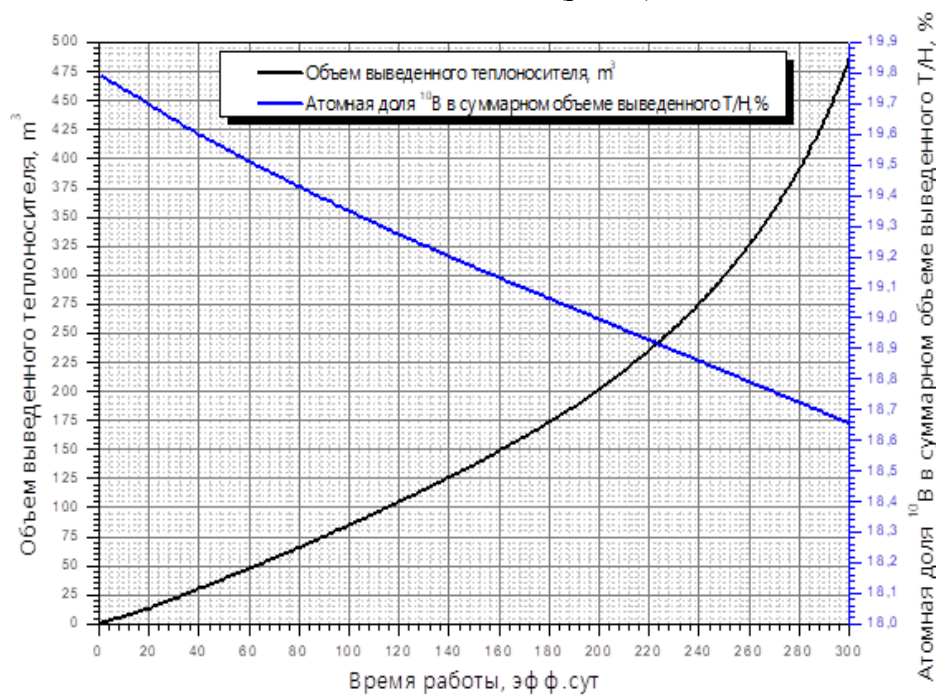


Рисунок 2. Зависимость объема выведенного теплоносителя и атомной доли ^{10}B в суммарном объеме выведенного теплоносителя во время работы реактора

Figure 2. Relationship between the volume of coolant removed and the proportion of ^{10}B in the total volume of coolant removed during reactor operation

Расчет выгорания изотопа ^{10}B в течение кампании реактора ВВЭР-440

Аналогичные расчеты были выполнены и для ВВЭР-440 энергоблока № 4 Нововоронежской АЭС. Значения параметров, используемых в расчете, приведены в таблице 4. Значение средней плотности потока тепловых нейтронов $\phi \approx 4,51 \times 10^{13} \text{ н}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ умножалось на 86400 (количество секунд в 1 сутках).

Таблица 4. Значения параметров, использованных в расчете выгорания изотопа ^{10}B по формуле (4) для ВВЭР-440

Table 4. Values of the parameters used in calculating the burn-up of the ^{10}B isotope using equation (4) for the VVER-440

Параметр	Значение
$\overline{\sigma}_a, \text{см}^2$	2,491E-21
$\phi \times t, \text{н}/(\text{см}^2)$	3,896E+18
$V_{a.z.}, \text{м}^3$	8,167
$V_{\text{ГЦК}}, \text{м}^3$	210

Значения критических концентраций борной кислоты при работе реактора энергоблока № 4 НВ АЭС с 48-ой топливной загрузкой на номинальной мощности приведены в таблице 5. Коэффициент пересчета концентрации ^{10}B в концентрацию борной кислоты выбран, исходя из доли ^{10}B 19,8 % и равен 31,2.

При расчетной длительности работы 48-ой топливной загрузки на номинальной

мощности на 336 эфф. сутки $C_{\text{БК}}$ становится равна нулю.

Таблица 5. Критические концентрации борной кислоты при работе энергоблока №4 НВАЭС с 48-й топливной загрузкой на номинальной мощности

Table 5. Critical concentrations of boric acid during operation of Power Unit No. 4 at the Novovoronezh NPP with the 48th fuel load at rated power

Тэфф, сут	$C_{\text{БК}}, \text{г}/\text{кг}$
0	7,08
100	4,79
200	2,63
300	0,66
340	0

По приведенным в таблице 5 данным путем интерполяции определяли значения концентраций борной кислоты и ^{10}B на каждые эффективные сутки. Расчеты изменения концентрации ^{10}B в теплоносителе 1 контура производились с учетом выгорания и выведения при подаче дистиллята для компенсации реактивности на каждые эфф. сутки «ступеньками» вплоть до 315 эфф. суток. Расчет выгорания ^{10}B производился до 315 эфф. суток так как из-за выгорания содержание ^{10}B в теплоносителе 1 контура стало равным нулю на 315 эфф. сутки.

На рисунке 3 показаны изменения концентрации ^{10}B в теплоносителе 1 контура и выгорание ^{10}B во время кампании реактора.

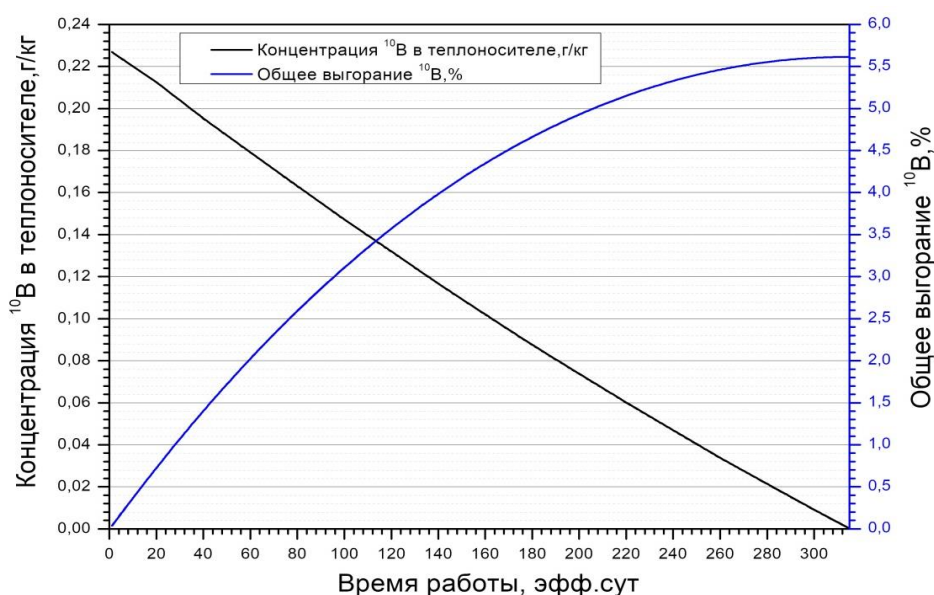


Рисунок 3. Изменение концентрации ^{10}B в теплоносителе первого контура и выгорания ^{10}B во время работы реактора

Figure 3. Change in the concentration of ^{10}B in the primary circuit coolant and the burnout of ^{10}B during reactor operation

Результаты расчетов показывают, что на 315 эфф. сутки количество выгоревшего ^{10}B составляет 5,61% от его первоначального значения.

Согласно рисунку 3, максимальное выгорание ^{10}B за месяц наблюдается в начальный момент кампании реактора и составляет примерно 1 %. Концентрация борной кислоты в теплоносителе 1 контура на 30 эфф. сутки составляет $\sim 6,4 \text{ г/дм}^3$. Атомная доля ^{10}B на 30 эфф. сутки составит $\sim 19,6 \%$ (при атомной доле в начале кампании 19,8 %). Так как ЛХА не учитывает выгорание ^{10}B , то при измеренном значении концентрации борной кислоты $6,4 \text{ г/дм}^3$ фактически мы имеем концентрацию, соответствующую $6,336 \text{ г/дм}^3$.

Анализ результатов

На практике, для компенсации выгорания ^{10}B в течение работы реактора необходимо увеличивать содержание борной кислоты

в первом контуре или вернее – медленнее разбавлять воду 1 контура дистиллятом. В расчетах эффект уменьшения концентрации изотопа ^{10}B не учитывается, поэтому расчетное значение концентрации борной кислоты не корректируется. Отсюда возникает разница расчетного и измеренного значения концентраций борной кислоты в течение кампании реактора.

Для иллюстрации данного процесса на рисунке 4 приведены данные за 7 месяцев работы энергоблока №2 НВАЭС-2 в течение 5 кампании реактора. Линии трендов показаний ЛХА, НАР-12М и имитационного расчета имеют разные углы наклона и соответственно разный темп изменения концентрации борной кислоты. За 7 месяцев работы реактора накопленное отличие в показаниях составляет $\sim 0,4 \text{ г/дм}^3$. При этом остановки реактора в течение кампании не оказывают существенное влияние на изменение изотопного соотношения $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$.

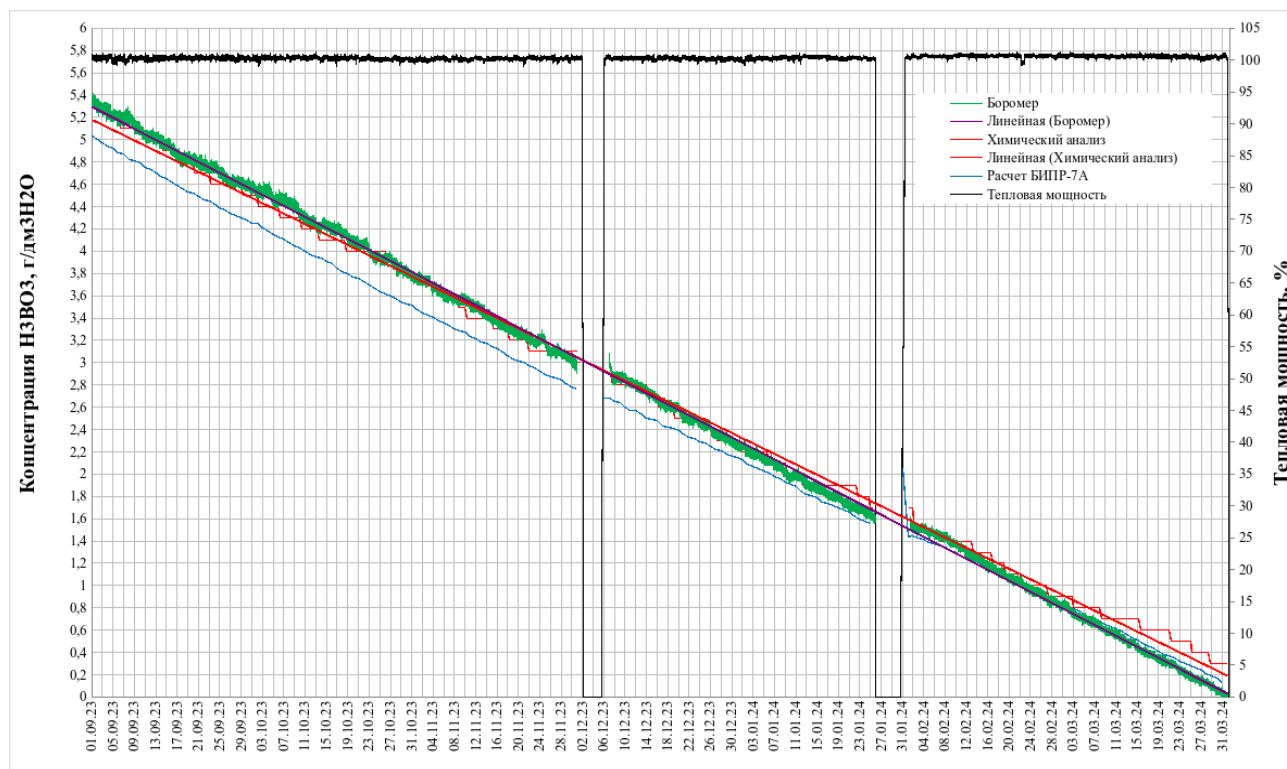


Рисунок 4. Изменение концентрации борной кислоты в течение 7 месяцев 5 топливной кампании энергоблока №2 НВАЭС-2

Figure 4. Change in boric acid concentration over the course of 7 months during the 5th fuel cycle of power unit No. 2 at the Novovoronezh NPP-2

С точки зрения обеспечения безопасности РУ рассмотрим стояночную концентрацию борной кислоты для энергоблока ВВЭР-1200, равную 17 г/дм^3 . При такой концентрации обеспечивается необходимая подкритичность в 2% с учетом возможных ошибок. В пересчете на концентрацию ^{10}B при естественной доле ^{10}B 19,8 % это будет $0,54 \text{ г/дм}^3$. Если же мы возьмем конец кампании реактора, когда доля ^{10}B становится равной 18,65 %, то необходимая безопасная концентрация борной кислоты должна составлять уже $17,9 \text{ г/дм}^3$. В единицах реактивности разница составит 1,1 %. Такое большое отличие имеет место только при больших абсолютных значениях концентрации борной кислоты. Описанные выше особенности не учитываются в эксплуатационной и проектной документации энергоблоков АЭС.

В процессе эксплуатации энергоблока поступление свежего (с природным содержанием соотношения изотопов) возможно в следующих случаях:

- режимы с перегрузкой ядерного топлива, когда происходит объединение бассейна выдержки облученного ядерного топлива и заполненной теплоносителем шахты реактора;
- аварийные режимы со срабатыванием гидроемкостей;
- проведение контроля герметичности оболочек ТВЭЛ в системе обнаружения дефектных сборок;
- компенсация неорганизованных протечек.

Таким образом, в режимах нормальной эксплуатации в течение кампании реактора заметных компенсации выгорающего нуклида поглотителя не ожидается, поскольку используется система рецикла борного раствора.

По результатам проведенного анализа можно сделать однозначный вывод о значительном сдвиге изотопного соотношения $^{10}\text{B}/^{11}\text{B}$ в ходе кампании реактора, поэтому в отсутствии четких проектных критериев контроля массовой концентрации ^{10}B во всех заполняемых системах 1 контура нельзя гарантировать соблюдение ПБЭ. Кроме того, становится возможным расхождение про-

гнозируемой и фактической продолжительности кампании реактора, что потенциально способно снижать величину коэффициента установленной мощности (КИУМ). Отдельного изучения требует вопрос о накопительном эффекте выгорания ^{10}B , который реализуется в теплоносителе 1 контура и связанных с ним системах за многолетний период эксплуатации. Другим, не менее важным вопросом для изучения, является оценка влияния эффекта выгорания ^{10}B на интегральную/дифференциальную эффективность ОР СУЗ в течение кампании реактора, поскольку константы для расчетов основаны на результатах измерений эффективности ОР СУЗ путем изменения концентрации РБК по ЛХА, проводимых перед каждой кампанией реактора.

Выводы из полученных результатов

В условиях объединения различных аспектов РБК (как фактора регулирования реактивности РУ и фактор, влияющий на ВХР) установление единых ПБЭ затруднительно.

На основании вышесказанного, можно сделать вывод, что обсуждаемая тема носит системный характер на АЭС с ВВЭР. Для выполнения требований нормативных документов, а также повышения эффективности и эксплуатационной надежности ВВЭР авторы видят необходимость принципиального изменения подхода к установлению ПБЭ в отношении массовых концентраций жидкого поглотителя.

Должна быть внедрена иерархическая система установления и контроля ПБЭ для раствора борной кислоты:

а) основной ПБЭ: для исходных растворов борной кислоты высокой и низкой концентрации в системах безопасности устанавливается нижний ПБЭ по массовой концентрации изотопа-поглотителя ^{10}B ;

б) для тех же растворов высокой и низкой концентрации устанавливается верхний ПБЭ по массовой концентрации РБК, который соответствует эксплуатационным и технологическим свойствам раствора РБК, как химического реагента. Верхний ПБЭ по ^{10}B не устанавливается;

в) контроль массовой концентрации ^{10}B на входном контроле и в ходе эксплуатации выполняется методом нейтронноабсорбционной спектрометрии (ОКБ-10 и НАР-12М) с регистрацией результатов в виде массовой концентрации ^{10}B без перевода в концентрацию РБК;

г) нормативы для имитационных расчетов, а также расчетов, участвующих

в управлении текущей реактивностью РУ устанавливаются в отношении концентрации ^{10}B ;

д) для поддержания норм ВХР, а также для текущей оценки выгорания ^{10}B выполняется контроль массовой концентрации РБК методом ЛХА.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Wan C., Bai J., Liu Y., Huang X., Wu H. Method research and engineering application of the B10-abundance correction for PWR. *Nuclear engineering and design*. 2021;378:111250. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111250>
 2. Boron 10. Framatome. Available at: <https://www.framatome.com/solutions-portfolio/product/a0045/> (accessed: 18.06.2026).
 3. Cossé C., Jolivel F., Berger M. Enriched boric acid as an optimized neutron absorber in the EPR primary coolant. *International Atomic Energy Agency*. 2012. Available at: <https://inis.iaea.org/records/x1rz4-59830> (accessed: 18.06.2026).
 4. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических ядерных реакторов. 2-е изд. Овчинников Ф.Я. [и др.]. Москва: Атомиздат, 1979. 288 с. Режим доступа: <https://www.livelib.ru/book/1000784368-ekspluatatsionnye-rezhimy-vodovodyanyh-energeticheskikh-yadernyh-reaktorov-vladimir-semenov> (дата обращения: 19.06.2026).
 5. Ломакин С.С. Ядерно-физические методы диагностики и контроля активных зон реакторов АЭС. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. 119 с. Режим доступа: <https://rgub.ru/searchopac/book.php?id=RGUB%5CBIBL%5C0000677556> (дата обращения: 19.06.2026).
 6. Стогов Ю.В. Основы нейтронной физики. Москва: МИФИ, 2008. 204 с. Режим доступа: https://elbib.biblioatom.ru/text/stogov_osnovy-neytronnoj-fiziki_2008/p1 (дата обращения: 20.06.2026).
 7. Таблицы физических величин : справочник. Под ред. И.К. Кикоина. Москва: Атомиздат, 1976. 1008 с. Режим доступа: <https://reallib.org/reader?file=453938&pg=10> (дата обращения: 19.06.2026).
- Tablitsy fizicheskikh velichin : spravochnik. Pod red. I.K. Kikoina. Moskva: Atomizdat, 1976. 1008 s. (In Russ.). Available at: <https://reallib.org/reader?file=453938&pg=10> (accessed: 19.06.2026).

ВКЛАД АВТОРОВ:

Гончаров Д.Н. – расчет выгорания нуклида поглотителя;
Кашенко П.В. – консультации, обсуждение результатов расчета, формирование выводов;
Колотушкин Д.С. – формулировка идеи, визуализация данных, выявление закономерностей, формирование выводов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ:

Заявляем об отсутствии внешнего финансирования при выполнении исследования.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ:

Конфликт интересов отсутствует.

AUTHORS' CONTRIBUTION:

Goncharov D.N. – calculation of the burnup of the absorber nuclide;
Kashchenko P.V. – consultations, discussion of the calculation results, drawing conclusions;
Kolotushkin D.S. – formulation of the idea, data visualization, identification of patterns, drawing conclusions.

FUNDING:

There is no external funding.

CONFLICT OF INTEREST:

No conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Даниил Николаевич Гончаров, инженер-физик, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация.
e-mail: GoncharovDN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Павел Валерьевич Кащенко, начальник участка, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация.
e-mail: KaschenkoPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Дмитрий Сергеевич Колотушкин, заместитель начальника отдела, Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» Нововоронежская АЭС, г. Нововоронеж, Воронежская область, Российская Федерация.

<https://orcid.org/0009-0004-2383-4056>

e-mail: KolotushkinDS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS:

Daniil N. Goncharov, Physics Engineer, Novovoronezh NPP the branch of JSC «Rosenergoatom Concern», Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: GoncharovDN@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Pavel V. Kashchenko, Site Head, Novovoronezh NPP the branch of JSC «Rosenergoatom Concern», Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.
e-mail: KaschenkoPV@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Dmitrii N. Kolotushkin, Novovoronezh NPP the branch of JSC «Rosenergoatom Concern», Novovoronezh, Voronezh region, Russian Federation.

<https://orcid.org/0009-0004-2383-4056>

e-mail: KolotushkinDS@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Поступила в редакцию / Received 23.06.2026

После доработки / Revision 08.09.2026

Принята к публикации / Accepted 11.09.2026