

УДК 621.039.526

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.12>*Оригинальная статья / Original paper*

Оценки выхода газообразных продуктов деления из мононитридного топлива в первый контур реактора БР-10

Д.В. Дмитриев, В.Д. Маркелов, Е.В. Филимонов

АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,

249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1

Реферат. Изложены результаты анализа экспериментальных данных по выходу газообразных продуктов деления (ГПД) из мононитридного топлива в газовую полость первого контура реактора БР-10, полученных при испытаниях твэлов с искусственными дефектами в оболочке. В современной ядерной энергетике нитридное топливо рассматривается как одно из наиболее перспективных видов топлива для реакторов на быстрых нейтронах, в связи с чем экспериментальные исследования его свойств при контакте с жидкометаллическими теплоносителями представляют большой интерес и создают необходимый массив исходных данных для проведения верификации имеющихся расчетных моделей. Такого рода исследования были проведены на реакторе БР-10 при испытаниях экспериментальных твэлов с искусственными дефектами в оболочке. Описаны условия проведения и результаты испытаний твэлов с мононитридным урановым топливом и искусственными дефектами в оболочках в реакторе БР-10, получены расчетные оценки скорости выхода ГПД из твэла с негерметичной оболочкой в натриевый теплоноситель при его контакте с топливом по моделям прямого вылета при делении и каскадного выбивания, также соответствующей объемной активности ГПД в газовой полости реактора, проведено сравнение полученной оценки с экспериментальными данными измерений на реакторе БР-10. Результаты проведенного исследования подтверждают предположение о том, что прямая отдача и каскадное выбивание атомов являются основными механизмами выхода ГПД из нитридного топлива.

Ключевые слова: быстрый реактор, натриевый теплоноситель, нитридное топливо, дефект оболочки, эксперимент, каскадное выбивание, расчетная оценка.

Для цитирования: Дмитриев Д.В., Маркелов В.Д., Филимонов Е.В. Оценки выхода газообразных продуктов деления из мононитридного топлива в первый контур реактора БР-10. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:190–201. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.12>

Введение

Применяемые в современной ядерной энергетике топливные материалы, такие как мононитридное или смешанное нитридное топливо (СНУП-топливо), могут выдерживать большие тепловые нагрузки и обладают рядом других преимуществ, благодаря которым они широко используются в качестве топлива в реакторах различного типа. Помимо высокой плотности и температуры плавления необходимо отметить механическую прочность и химическую устойчивость при взаимодействии с жидкометаллическим теплоносителем.

Согласно данным, приведенным в работе [1], нитридное топливо характеризуется значительно более высокими значениями теплопроводности и плотности в сравнении с топливом оксидного типа (урановым и смешанным уран-плутониевым). Эти свойства обуславливают более низкие значения температуры в нитридном топливе и отсутствие изменения его структуры при облучении, что непосредственно влияет на выход продуктов деления (ПД) из топлива.

Вместе с тем малый выход ПД из нитридного топлива является как весомым преимуществом, которое проявляется в меньших последствиях загрязнения сред первого контура при разгерметизации оболочки твэла, так и существенным недостатком, осложняющим задачу диагностирования разгерметизации средствами системы контроля герметичности оболочек твэлов в реакторе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.

Ввиду малого объема имеющихся экспериментальных данных по выходу ПД из нитридного топлива под оболочку твэла и в теплоноситель при возникновении дефектов в оболочках на эксплуатируемых реакторах для обоснования и верификации модели выхода ПД из нитридного топлива можно использовать данные, полученные на реакторе БР-10 [2 – 4].

Целями проведенного авторами исследования являлись

- анализ имеющихся данных по выходу газообразных ПД (ГПД) в газовую полость реактора БР-10, полученных по результатам испытаний мононитридного уранового топлива, облучавшегося в экспериментальных твэлах с искусственными дефектами;
- получение расчетных оценок объемной активности ГПД в газовой полости реактора БР-10 при облучении экспериментальных твэлов с искусственными дефектами с использованием моделей прямого вылета при делении и каскадного выбивания атомов ГПД осколками деления с поверхности топлива, контактирующей с натриевым теплоносителем;
- сравнение полученных оценок с экспериментальными данными по выходу ГПД в первый контур реактора БР-10, верификация расчетной модели, обоснование прямого вылета и каскадного выбивания как основных механизмов выхода ГПД при взаимодействии нитридного топлива с натриевым теплоносителем.

Стоит отметить, что данная работа является прямым продолжением проводившихся ранее исследований по анализу опыта эксплуатации реактора БР-10 с искусственными дефектами в оболочках твэлов [5].

Условия проведения испытаний

Система контроля герметичности оболочек твэлов по активности газа в реакторе БР-10 представляет собой систему отбора проб газа из газовых объемов насосов [6]. В качестве детекторов для регистрации активности ГПД использовались как датчики β -активности, так и сцинтилляционные спектрометры различного типа.

Детальное описание условий проведения испытаний и конфигурации активной зоны реактора БР-10 содержится в работах [2–5]. В настоящей статье приведены лишь данные, необходимые для выполнения оценок выхода ГПД из твэла с искусственным дефектом в оболочке. Для проведения расчетного анализа рассматривался экспериментальный твэл ЭН-11 с топливом из мононитрида урана 95%-го обогащения по урану-235. Твэл имел длину 615 мм, наружный диаметр оболочки 8,4 мм с толщиной стенки 0,4 мм, высоту топливного столба, равную 400 мм, и диаметр топливных брикетов 7,4 мм. Искусственный дефект имел вид продольной щели размером 50 мм \times 0,2 мм и располагался в середине высоты топливного столба. Время облучения составляло 85 суток при средней линейной мощности твэла, равной 32 кВт/м.

Выбор твэла ЭН-11 был обусловлен рядом факторов, среди которых можно отметить следующие:

- максимально омываемую натрием поверхность топлива при его затекании под оболочку с заполнением газового зазора (вся поверхность топливного столба);
- достаточно большой размер дефекта (площадью 10 мм²);
- расположение дефекта в зоне с максимальным энерговыделением (в середине высоты топливного столба);
- размещение компенсационного объема твэла в его верхней части.

Математическая модель выхода газообразных продуктов деления из мононитридного топлива

При отсутствии химического взаимодействия нитридного топлива с натриевым теплоносителем выход радиоактивных нуклидов ПД из топлива теоретически может одновременно происходить посредством следующих трех механизмов [7]:

- прямого вылета (отдачи) при делении тяжелых ядер;
- каскадного выбивания атомов, инициированного осколками деления;
- диффузионно-пузырьковой миграции ПД к открытым поверхностям.

Основные факторы, влияющие на соотношение между различными механизмами выхода, включают в себя интенсивность делений (скорость выгорания делящихся нуклидов) в топливе, скорость радиоактивного распада нуклида, плотность и структуру топлива, а также температурные характеристики твэла.

Продукты деления, относящиеся к ГПД (Xe-133, Xe-135, Kr-85m, Kr-88 и Kr-87), являются относительно короткоживущими нуклидами, для большинства из которых период полураспада лежит в диапазоне от 80-ти минут до пяти суток. Данный фактор является одним из определяющих при установлении соотношения между вкладом различных механизмов выхода ГПД в их суммарное поступление из топлива в теплоноситель.

Выход ГПД посредством прямого вылета осколков (*recoil*) может происходить только из достаточно тонкого поверхностного слоя топлива толщиной не более величины среднего пробега осколка в матрице топлива (μ_{ff}). Для уранового оксидного топлива значение параметра μ_{ff} согласно данным [7], составляет приблизительно 10 мкм. В нитридном топливе с более высокой плотностью пробег осколка может быть немного меньше, однако для расчетных оценок этот фактор является малозначимым, поэтому приближенно величину пробега можно считать равной приведенному выше значению вне зависимости от вида топлива.

Через открытую поверхность топлива посредством прямого вылета выходит только определенная часть осколков, образующихся в поверхностном слое толщиной μ_{ff} . В соответствии с описанной в [7] моделью поток (скорость выхода) атомов прямым вылетом с единичной поверхности (атомов/с/см²) вычисляется следующим образом:

$$I_{rec} = \frac{1}{4} \cdot y \cdot F \cdot \mu_{ff}, \tag{1}$$

где y – кумулятивный выход нуклида при делении (атомов/деление); F – плотность делений в поверхностном слое топлива (делений/с/см³).

Таким образом, скорость выхода из топлива посредством прямой отдачи пропорциональна мощности твэла и не зависит от скорости радиоактивного распада нуклида. Концентрация нуклида в топливе в результате прямого вылета линейно уменьшается в два раза в поверхностном слое толщиной μ_{ff} .

Механизм каскадного выбивания (*knock-out*) является вторичным по отношению к прямому вылету, поскольку образующиеся при делении осколки могут порождать каскад столкновений, приводящий к выходу некоторой части атомов ГПД из топливной матрицы. Согласно приведенным в [7] оценкам, около 10% начальной кинетической энергии осколка деления передается выбиваемым в каскаде столкновений атомам, почти поровну распределяясь между первично выбитыми атомами и массивом остальных выбиваемых атомов более высокого порядка.

В таблице 1 приведены оценочные средние значения параметров, характеризующих каскадное выбивание, полученные для уранового оксидного топлива [7]:

- среднее количество выбиваемых атомов в каскаде столкновений, вызванном одним осколком деления (n_{kno});
- средняя кинетическая энергия выбиваемых атомов (E_{kno});
- средний пробег выбиваемых атомов (μ_{kno}).

Количество и энергия выбиваемых атомов определяются начальной энергией осколка деления и сечениями рассеяния выбиваемых атомов на траектории движе-

Таблица 1

Оценочные средние значения характеристик каскадного выбивания в урановом оксидном топливе [7]

Параметр	Первично выбиваемые атомы	Выбиваемые атомы более высокого порядка
n_{kno} атомов на осколок	28	21000
E_{kno} кэВ	100	0,2
μ_{kno} ангстрем (10 – 4 мкм)	220	44

ния выбивающих ядер; и их можно считать независимыми от вида и характеристик топлива. Величина пробега выбиваемых атомов μ_{kno} , как и в случае прямого вылета, для нитридного топлива может быть несколько меньше значений, приведенных в табл. 2. Для упрощения расчетов и в запас оценок средний пробег приблизительно принимается равным 50-ти ангстрем (0,005 мкм).

Таблица 2

Расчетные соотношения для определения потока выбиваемых атомов ГПД с единичной площади поверхности

Интервал значений (условие)	Расчетное выражение (I_{kno})
$H \leq 0,1$	$\frac{1}{8} \cdot y \cdot F \cdot \mu_{kno} \cdot H$
$0,1 < H \leq 0,5$	$\frac{1}{8} \cdot y \cdot F \cdot \mu_{kno} \cdot H \cdot \varphi(H)^*$
$0,5 < H \leq 3,0$	$\frac{1}{8} \cdot y \cdot F \cdot \mu_{kno} \cdot H \cdot \varphi(H)^{**}$
$H > 3,0$	$\frac{1}{2} \cdot 0,017 \cdot y \cdot F \cdot \mu_{kno} \cdot H$

* В работе [7] описан способ вычисления функции $\varphi(H)$ с использованием числовых рядов.
 ** Аналитическое выражение для $\varphi(H)$ отсутствует, используются приближенные значения $\varphi(H)$ в соответствии с графиком, приведенным на рис. 2.

Для расчетных оценок выхода ГПД посредством каскадного выбивания требуется моделирование изменения их концентрации вблизи поверхности топлива. На рисунке 1 показаны соответствующие зависимости, выраженные в безразмерных единицах, для

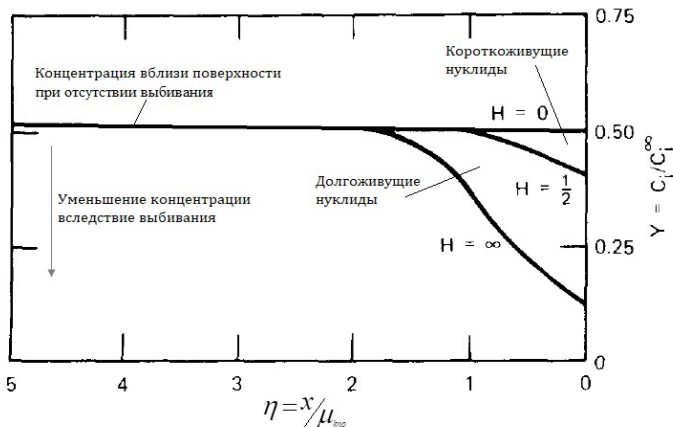


Рис. 1. Изменение относительной концентрации продуктов деления $Y(\eta, H)$ вблизи поверхности топлива вследствие каскадного выбивания в зависимости от значения параметра H : μ_{kno} – средняя длина пробега выбиваемых атомов; $\eta = x/\mu_{kno}$ – относительное расстояние от поверхности на глубине x ; $C = C(\eta, H)$ – концентрация на расстоянии η от поверхности; C^∞ – концентрация внутри объема топлива

относительной концентрации $Y(\eta, H) = \frac{C(\eta, H)}{C^\infty}$ при изменении относительного расстояния от поверхности η , и при различных значениях параметра H , характеризующего отношение скорости выбивания нуклида к скорости его радиоактивного распада.

Значение безразмерного параметра H определяется следующим соотношением:

$$H = H(F) = \frac{2 \cdot n_{kno}}{\lambda} \cdot \frac{F}{N_U}, \quad (2)$$

где n_{kno} – среднее количество выбиваемых атомов в расчете на осколок деления; λ – постоянная радиоактивного распада нуклида, c^{-1} ; N_U – концентрация тяжелых атомов в топливе, ядер/см³.

Ввиду обратной зависимости от постоянной распада при одной и той же мощности значения параметра H для короткоживущих нуклидов значительно меньше, чем для долгоживущих, и приближаются к нулю в случае очень малого времени их жизни. При оценке выхода долгоживущих ПД значения H могут быть сколь угодно большими.

Характер зависимости концентрации $Y(\eta, H)$ от относительной глубины η является довольно сложным, и может быть описан в полиномиальном виде на каждом из интервалов в пределах целочисленных значений параметра η .

Как видно из рисунка 1, во всем диапазоне возможных значений параметра H концентрация $Y(\eta, H)$ отличается от значения $Y_0 = 1/2$, соответствующего концентрации на поверхности вследствие механизма прямого вылета, только на интервале значений $\eta < 2$. Это означает, что каскадное выбивание атомов ПД проявляет себя в очень тонком поверхностном слое топлива толщиной не более $2 \cdot \mu_{kno}$, что примерно в 1000 раз меньше толщины слоя, из которого происходит прямой вылет осколков деления.

С учетом этих свойств для потока выбиваемых атомов через единичную поверхность топлива в [7] получено следующее выражение:

$$I_{kno} = \frac{1}{8} \cdot y \cdot F \cdot \mu_{kno} \cdot H \cdot \varphi(H), \quad (3)$$

где $\varphi(H) = 4 \cdot \int_0^1 Y(\eta, H) \cdot (1 - \eta) d\eta$.

Интегральный множитель $\varphi(H)$ в выражении (3) может быть вычислен по аналитическим формулам только в интервале $0 < H < 1/2$. При значениях параметра $H > 1/2$ прямое вычисление $\varphi(H)$ становится затруднительным, и можно использовать лишь приближенные оценочные значения, показанные на рис. 2. Теоретическое минимальное значение этой функции при неограниченном росте H составляет $\varphi_{min} = 0,068$.

В области значений параметра $H < 0,1$ безразмерная концентрация $Y(\eta, H)$ очень близка к $1/2$, и как следствие, множитель $\varphi(H)$ представляет собой почти линейную функцию, близкую к единице: $\varphi(H) \rightarrow 1$ при $H \rightarrow 0$.

С учетом описанных выше свойств в табл. 2 приведены расчетные выражения для вычисления скорости выхода атомов ПД посредством выбивания с единичной поверхности топлива.

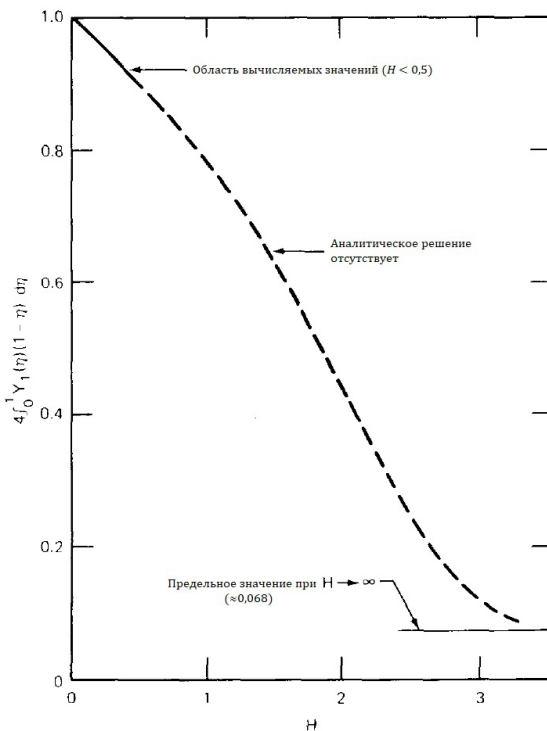


Рис. 2. Зависимость множителя $\phi(H)$ в выражении для потока выбиваемых атомов ПД на поверхности топлива I_{kno} от значения параметра H

равным 600.

Процессы, приводящие к выходу ГПД посредством диффузионно-пузырькового механизма (*diffusion-bubble release*), имеют место во всем объеме топлива; при этом могут одновременно происходить следующие явления:

- термическая диффузия атомов к открытым поверхностям топлива;
- миграция атомов из топливной матрицы в газовые пузырьки, т.е. их «захват» пузырьками (в расчетной модели предполагается поступление атомов в пузырьки только посредством диффузии);
- выбивание атомов из газовых пузырьков обратно в топливную матрицу осколками деления («рассасывание» пузырьков);
- перенос атомов к открытым поверхностям в составе газовых пузырьков при их миграции в топливе, скорость которой определяется полем градиента температуры.

Необходимые расчетные выражения для относительного выхода нуклидов из топлива выводятся из условия сохранения равновесного соотношения между перечисленными физическими процессами, которые приведены в [7].

Ввиду значительной сложности модели диффузионно-пузырькового выхода провести сравнение его относительного вклада с механизмами прямого вылета и каскадного выбивания аналитическим путем не представляется возможным. Требуемые оценки можно получить только посредством сопоставления результатов расчета по имеющимся моделям при одних и тех же параметрах облучения нитридного топлива, что выполнено применительно к ГПД в работе [8].

Как следует из соотношений (3) и (2), скорость выхода ГПД из топлива каскадным выбиванием обратно пропорциональна скорости радиоактивного распада нуклида.

При расчете относительного выхода ГПД из топлива необходимо принимать во внимание, что выход прямой отдачей, в основном, происходит с геометрической поверхности топлива, а выход каскадным выбиванием возможен со значительно большей площади, включающей в себя внутренние поверхности, образующиеся при появлении трещин, открытых пор и других дефектов. В работе [7] приведено экспериментальное обоснование соотношения между полной площадью поверхности топлива (S_t) и площадью геометрической поверхности (S_g) для оксидного уранового топлива. Соответствующее отношение ($\theta = S_t/S_g$) принимается в дальнейших расчетах, оценивается значением,

Согласно полученным расчетным данным, вследствие высокой теплопроводности радиальный перепад температуры топлива от поверхности к центральной оси твэла при характерных для эксплуатации реакторов типа БН значениях энерговыделения не превышает 200–300°C, что обуславливает относительно невысокие значения температуры и термического градиента по всему объему топлива. Как следствие, в нитридном топливе значительно медленнее в сравнении с оксидным протекают описанные выше процессы, формирующие диффузионно-пузырьковый механизм выхода ГПД – термическая диффузия и движение газовых пузырьков.

Кроме того необходимо принимать во внимание относительно малое время жизни ГПД. Поскольку диффузия атомов и миграция пузырьков в топливе – достаточно медленные процессы в сравнении со скоростью распада, следствием этого является то, что диффузионно-пузырьковый выход ГПД почти не проявляет себя в нитридном топливе.

Расчетные оценки выхода газообразных продуктов деления из нитридного топлива и их сравнение с экспериментальными данными

Результаты расчетных оценок скорости выхода атомов ГПД в твэле ЭН-11 по механизмам прямой отдачи и каскадного выбивания с поверхности монокридного топлива под оболочку приведены в табл. 3. Анализ результатов приведенных в таблице, позволяет сделать вывод, что в зависимости от постоянной распада соотношение между вкладом прямого вылета и каскадного выбивания оказывается различным.

Таблица 3

Расчетные оценки скорости выхода атомов ГПД из монокридного топлива твэла ЭН-11

Нуклид ГПД	Постоянная распада, 1/с	Прямая отдача (I_{rec}), ат/с	Каскадное выбивание (I_{kno}), ат/с	Параметр H
Xe-133	$1,53 \cdot 10^{-6}$	$3,82 \cdot 10^{10}$	$7,36 \cdot 10^9$	18,89
Xe-135	$2,11 \cdot 10^{-5}$	$3,75 \cdot 10^{10}$	$5,32 \cdot 10^9$	1,37
Kr-85m	$4,29 \cdot 10^{-5}$	$6,91 \cdot 10^9$	$6,06 \cdot 10^8$	0,67
Kr-88	$6,78 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{10}$	$1,19 \cdot 10^9$	0,43
Kr-87	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$1,49 \cdot 10^{10}$	$4,15 \cdot 10^8$	0,19

Равновесная активность в газовой полости без учета задержки на время переноса внутри твэла (до выхода через дефект) и в теплоносителе численно равна значению этой скорости в Бк. В таблице 4 приведены расчетные значения равновесной объемной активности ГПД в газовой полости в сравнении с измеренными значениями на реакторе БР-10.

По результатам анализа данных табл. 4 видно, что расчетные значения объемной активности для изотопов ксенона примерно в два раза ниже измеренных, а для изотопов криптона – в среднем в три раза выше. Предполагаемыми причинами данных расхождений могут быть следующие факторы.

Таблица 4

Оценки равновесной активности ГПД в газовой полости в сравнении с измеренными на реакторе БР-10

Нуклид ГПД	Объемная активность в газовой полости, МБк/л		Отношение (расчет/измерение)
	Расчет	Измерение [2–4]	
Xe-133	91,1	163	0,56
Xe-135	85,6	158	0,54
Kr-85m	15,0	7,0	2,15
Kr-88	42,7	12,1	3,53
Kr-87	30,7	9,3	3,30

- Имеющаяся неопределенность значения площади внутренних поверхностей в топливе вследствие образования трещин, открытых пор и других дефектов. Как указано выше, в расчетной модели отношение полной поверхности к геометрической принималось как для оксидного уранового топлива.

- Отсутствие учета времени задержки ГПД внутри твэла до выхода в теплоноситель. В исследуемой расчетной модели предполагается, что ГПД выходят со всей поверхности топлива, контактирующей с натрием, и сразу попадают в первый контур реактора, что является допустимым упрощением. В действительности, выходящим из топлива атомам ГПД требуется существенное время для того, чтобы мигрировать к месту расположения сквозного дефекта оболочки и перейти в основной объем теплоносителя (зависящее от размера и геометрической формы дефекта, а также от конструкции твэла). Как следствие, скорость выхода ГПД через дефект оказывается несколько меньше скорости выхода из топлива. Учет данного фактора также уменьшит расчетную оценку объемной активности ГПД.

- Неопределенность коэффициента дегазации теплоносителя, который определяется как отношение скорости выхода ГПД из теплоносителя в газовую полость к их содержанию в теплоносителе. Более корректное моделирование данного процесса может уменьшить расчетную оценку для ГПД.

- Отсутствие учета поверхностного загрязнения оболочек твэлов. Стоит упомянуть, что в работах [2–4] за время исследования первых пяти экспериментальных твэлов с искусственными дефектами величина поверхностного загрязнения возросла в два раза по сравнению с начальной, что увеличило измеренную активность ГПД в газовой полости реактора.

Заключение

Анализ результатов реакторных испытаний экспериментального твэла ЭН-11 с моноснитридным топливом с искусственным дефектом в оболочке, облученного в активной зоне реактора БР-10, проведен с целью

- подтверждения предположения, что выход ГПД из нитридного топлива в условиях облучения реактора на быстрых нейтронах происходит, в основном, посредством механизмов прямой отдачи и каскадного выбивания, при отсутствии значимого диффузионно-пузырькового выхода и химического взаимодействия топлива с натрием;

- проверки корректности (валидации) применяемых математических моделей выхода ГПД из нитридного топлива.

Сравнение приведенных в статье расчетных оценок объемной активности ГПД в газовой полости реактора БР-10 с измеренными системой контроля герметичности оболочек твэлов по активности газа в целом позволяет сделать вывод о правильности исходных предположений и используемых расчетных моделей. Вместе с тем ввиду имеющегося расхождения между результатами расчетов и измерений представленную модель необходимо доработать в части учета процессов миграции ГПД внутри твэла и по средам первого контура. При условии такой доработки полученные результаты можно использовать для обоснования безопасности испытаний и эксплуатации твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом.

Литература

1. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшикова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 423 с., 1978. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/kotelnikov_vysokotemperaturnoe-yadernoe-toplivo_1978/p0/ (дата обращения 20.04.2026).
2. Ефимов И.А., Мамаев Л.И., Бец Н.И., Жилкин А.С., Шестопалов Е.В. Изучение выхода радиоактивных продуктов при работе реактора БР-5 (БР-10) с негерметичными твэлами. Сборник докладов юбилейной конференции «От исследований на БР-5 (БР-10) к проектам демонстрационных и энергетических быстрых реакторов». Обнинск, 2009, с. 55–66.
3. Ефимов И.А., Мамаев Л.И., Крючков Е.А., Жилкин А.С., Бец Н.И. Опыт работы реактора БР-5 (БР-10) с различными топливными композициями (PuO_2 , UC , UN). Сборник докладов юбилейной конференции «От исследований на БР-5 (БР-10) к проектам демонстрационных и энергетических быстрых реакторов». Обнинск, 2009, с. 44–54.
4. Мамаев Л.И., Ефимов И.А., Крючков Е.А., Бец Н.И. Исследования выхода продуктов деления из различных топливных композиций (UN , U , UO_2+PuO_2 , $\text{UC}+\text{PuC}$, сплав U,Pu) из твэлов, имеющих искусственный дефект в оболочке. Сборник докладов юбилейной конференции «От исследований на БР-5 (БР-10) к проектам демонстрационных и энергетических быстрых реакторов». Обнинск, 2009, с. 67–73.
5. Дмитриев Д.В., Жилкин А.С., Филимонов Е.В. Оценки выхода урана из мононитридного топлива в первый контур реактора БР-10. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:122–132. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.09>
6. Ефимов И.А., Мамаев Л.И., Филонов В.С. Контроль герметичности твэлов на реакторе БР-5. *Атомная энергия*. 1971;31(6):567–571. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t31-6_1971/p567/ (дата обращения 20.04.2026).
7. Olander D. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. Department of nuclear engineering university of California. Berkley, 1976.
8. Дмитриев Д.В., Жилкин А.С., Маркелов В.Д., Филимонов Е.В. Расчетное моделирование выхода продуктов деления из топлива различного вида по программе Альфа-БН 1.0. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2025(3):81–92. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2025/issue2025-3-81-92.pdf> (дата обращения 20.04.2026).

Поступила в редакцию 20.02.2026

После доработки 28.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

Авторы

Дмитриев Денис Витальевич, научный сотрудник,

E-mail: dvdmitriev@ippe.ru

Маркелов Виталий Дмитриевич, инженер-исследователь,

E-mail: vdmarkelov@ippe.ru

Филимонов Евгений Витальевич, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.,

E-mail: evfilimonov@ippe.ru

UDC 621.039.526

Estimates of Gaseous Fission Product Release from Mononitride Fuel into the Primary Circuit of the BR-10 Reactor

Dmitriev D.V., Markelov V.D., Filimonov E.V.

IPPE JSC,

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga reg., Russia

Abstract

The article presents the results of an analysis of experimental data on the release of gaseous fission products (GFP) from mononitride fuel into primary circuit gas cavity of the BR-10 reactor, obtained during tests of failed fuel element.

In modern nuclear power engineering, nitride fuel is considered as one of the most promising types of fuel for fast neutron reactors, and therefore experimental studies of its properties in contact with liquid metal heat carriers are of great interest and create the necessary array of initial data for verifying existing computational models. Such studies were carried out at the BR-10 reactor as part of experimental fuel elements with failed fuel element. The conditions for experiment fuel elements with mononitride uranium fuel and failed fuel element in the cladding in the BR-10 reactor are described, calculated estimates of the rate of GFP release from a fuel element with a leaky shell into a sodium coolant carrier upon its contact with fuel are obtained using models of recoil and knock-out, as well as the corresponding volumetric activity of GFP in the gas cavity of the reactor, the obtained estimate was compared with experimental measurement data on the reactor BR-10. The results of the study confirm the assumption that recoil and knock-out as the main mechanism for GFP release from nitride fuel.

Keywords: fast reactor, sodium coolant, nitride fuel, failed fuel element, experiment, cascade knocking, calculating estimate.

For citation: Dmitriev D.V., Markelov V.D., Filimonov E.V. Estimates of Gaseous Fission Product Release from Mononitride Fuel into the Primary Circuit of the BR-10 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:190–201. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.12> (in Russian).

References

1. Kotelnikov R.B., Bashlikov S.N., Kashtanov A.I., Menshikova T.S. High-temperature nuclear fuel. Issue 2. Moscow, Atomizdat Publ., 423 p., 1978. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/kotelnikov_vysokotemperaturnoe-yadernoe-toplivo_1978/p0/ (accessed Apr. 20, 2026) (in Russian).
2. Efimov I.A., Mamaev L.I., Betc N.I., Zhilkin A.S., Shestopalov E.V. Study of the release of radioactive products reactor BR-5 (BR-10) operation with an artificial defect in the cladding. Collection of papers from the anniversary conf. "From Research on BR-5 (BR-10) to Projects of Demonstration and Power Fast Reactors". Obninsk, IPPE, 2009, p. 55–66.

3. Efimov I.A., Mamaev L.I., Kryuchkov E.A., Zhilkin A.S., Betc N.I. Experience of BR-5 (BR-10) reactor operation with different fuel compositions (PuO_2 , UC, UN). Collection of papers from the anniversary conf. "From Research on BR-5 (BR-10) to Projects of Demonstration and Power Fast Reactors". Obninsk, IPPE, 2009, p. 44–54.
4. Mamaev L.I., Efimov I.A., Kryuchkov E.A., Betc N.I. Studies of the yield of fission products from various fuel compositions (UN, U, UO_2+PuO_2 , UC+PuC, U, Pu alloy) from fuel elements with an artificial defect in the cladding. Collection of papers from the anniversary conf. "From Research on BR-5 (BR-10) to Projects of Demonstration and Power Fast Reactors". Obninsk, IPPE, 2009, p. 67–73.
5. Dmitriev D.V., Zhilkin A.S., Filimonov E.V. Uranium release evaluation from mononitride fuel into the primary circuit of the BR-10 reactor. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:122–132. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.09>
6. Efimov I.A., Mamaev L.I., Filonov V.S. Burst cartridge detection in BR-5. *Atomnaya energiya*. 1971;31(6):567–571. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t31-6_1971/p567/ (accessed Apr. 20, 2026) (in Russian).
7. Olander D. Fundamental aspects of nuclear reactor fuel elements. Department of nuclear engineering university of California. Berkley, 1976.
8. Dmitriev D.V., Jilkin A.S., Markelov V.D., Filimonov E.V. Computational modeling of the fission product yield from various types of fuel according to the Alpha-BN 1.0 program. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*. 2025(3):81–92. URL: <https://vant.ippe.ru/images/pdf/2025/issue2025-3-81-92.pdf> (accessed Apr. 20, 2026) (in Russian).

Authors

Denis V. Dmitriev, Researcher,

E-mail: dvdmitriev@ippe.ru;

Vitalii D. Markelov, Research engineer,

E-mail: vdmakelov@ippe.ru;

Evgenii V. Filimonov, Senior Researcher, Cand. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: evfilimonov@ippe.ru.