

УДК 621.039.59

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.04>  
Оригинальная статья / Original paper

## Азот под оболочкой ТВЭЛОВ со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом

А.Ф. Грачев<sup>1</sup>, Л.М. Забудько<sup>1</sup>, Е.Е. Мариненко<sup>2</sup>, С.И. Поролло<sup>2</sup>, А.В. Беляева<sup>3</sup>,  
Ф.Н. Крюков<sup>3</sup>, В.Г. Теплов<sup>3</sup>, М.В. Скупов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>АО «Прорыв»,  
119607 Россия, г. Москва, Раменский бульвар, д. 1

<sup>2</sup>АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»,  
249033 Россия, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1

<sup>3</sup>АО «ГНЦ НИИАР»,  
433510 Россия, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное шоссе, д. 9

<sup>4</sup>АО «ВНИИНМ»,  
123098 Россия, г. Москва, ул. Рогова, д. 5а

**Реферат.** В ТВЭлах с газовым подслоем внутреннее пространство заполняется гелием для обеспечения теплоотвода от топлива. В процессе облучения в результате выхода газообразных продуктов деления состав исходной газовой среды под оболочкой ТВЭла изменяется, что приводит к изменению его теплофизических характеристик. Послереакторными исследованиями показано, что парциальное давление азота под оболочками ТВЭлов увеличивается с ростом выгорания топлива, так как в результате облучения из нитридного уран-плутониевого топлива под оболочку ТВЭлов кроме инертных газов криптона, ксенона и гелия выходят также атомы азота. Механизмы выхода инертных газов и азота из нитрида различны: диффузионный механизм для инертных газов и выбивание осколками деления для азота. Различие в механизмах выхода газов приводит к существенному количественному различию выхода газов под оболочку. Удельный выход азота под оболочку ТВЭлов значительно ниже удельного выхода остальных газов, но его наличие является важным фактором, так как от давления азота под оболочкой ТВЭла зависит температура диссоциации смешанного нитрида, а также азотирование внутренней поверхности оболочки. Проведены обобщение и анализ результатов послереакторных исследований содержания азота в газовой смеси под оболочками 87-ми исследованных ТВЭлов после облучения в реакторе БН-600 в составе 17-ти экспериментальных ТВС со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных до максимального выгорания топлива от 3 до 9% т.а.

**Ключевые слова:** смешанное нитридное уран-плутониевое топливо, экспериментальные ТВЭлы, экспериментальные ТВС, послереакторные исследования, парциальное давление азота, газообразные продукты деления, азотирование оболочки, инертные газы.

© Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Мариненко Е.Е., Поролло С.И., Беляева А.В., Крюков Ф.Н., Теплов В.Г., Скупов М.В., 2025

**Для цитирования:** Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Мариненко Е.Е., Поролло С.И., Беляева А.В., Крюков Ф.Н., Теплов В.Г., Скупов М.В. Азот под оболочкой твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;2:40–49. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.04>

## Введение

Для обеспечения теплоотвода от топливной композиции в твэлах с газовым подслоем внутреннее пространство заполняется гелием. В зависимости от конструкции твэла и технологии его изготовления процентное содержание и давление гелия под оболочкой могут быть различными. В процессе облучения в результате выхода газообразных продуктов деления состав исходной газовой среды под оболочкой твэла изменяется, что приводит к изменению его теплофизических характеристик. Поэтому изучение кинетики и механизмов выхода газа из топлива в результате облучения является одной из наиболее важных задач при послереакторных исследованиях твэлов. В работах [1, 2] приводятся результаты исследования выхода газообразных продуктов деления (Xe и Kr) и гелия под оболочку твэлов с урановым и смешанным уран-плутониевым нитридным топливом после облучения в реакторах БР-10 и БН-600. Установлено, что в наибольшем количестве из нитридного топлива выделяются ксенон, затем гелий и криптон. Систематические послереакторные исследования, проведенные в АО «ГНЦ НИИАР», показали, что в состав газовой смеси под оболочками облученных нитридных твэлов входит также азот. Несмотря на то, что в процентном отношении количество азота под оболочкой твэла невелико по сравнению с другими газами, он является важным параметром, так как от давления азота под оболочкой твэла зависит температура диссоциации смешанного нитрида, а также азотирование внутренней поверхности оболочки.

В данной статье проводятся обобщение и анализ результатов исследования содержания азота в газовой смеси под оболочками 87-ми исследованных твэлов после облучения в реакторе БН-600 в составе 17-ти экспериментальных ТВС со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных до максимального выгорания топлива от 3 до 9% т.а.

## Результаты измерения содержания азота под оболочкой нитридных твэлов реактора БН-600

При изготовлении внутренний объем твэлов реактора БН-600 со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, согласно техническим условиям, заполняется гелием с объемным содержанием не менее 94% при атмосферном давлении. Если считать, что остальная часть газовой смеси является воздухом (78% азота), то максимальное парциальное давление азота под оболочкой твэла в исходном состоянии не должно превышать  $4,7 \cdot 10^{-3}$  МПа. Прокол оболочек двух твэлов-свидетелей № 0050 и № 0420 комбинированной экспериментальной сборки КЭТВС-б до облучения показал, что парциальное давление азота в них составляет  $2,8 \cdot 10^{-3}$  и  $3,12 \cdot 10^{-3}$  МПа, т.е. твэлы соответствуют техническим условиям (рис. 1).

## Nitrogen under Cladding of Fuel Pins with Mixed Uranium-Plutonium Nitride

При проведении послереакторных исследований в АО «ГНЦ НИИАР» при проколе облученных в реакторе БН-600 нитридных твэлов наряду с измерением общего количества газа под оболочкой твэла исследовался и состав газа, в том числе измерялось процентное содержание азота в газовой смеси. На рисунке 1 показаны средние значения парциального давления азота под оболочкой твэлов КЭТВС вместе с парциальным давлением азота в твэлах-свидетелях КЭТВС-6, а также приведено расчетное давление азота в исходном твэле при заполнении его гелием на 94%. На рисунке 2 показаны средние значения парциального давления азота под оболочками твэлов исследованных ЭТВС.

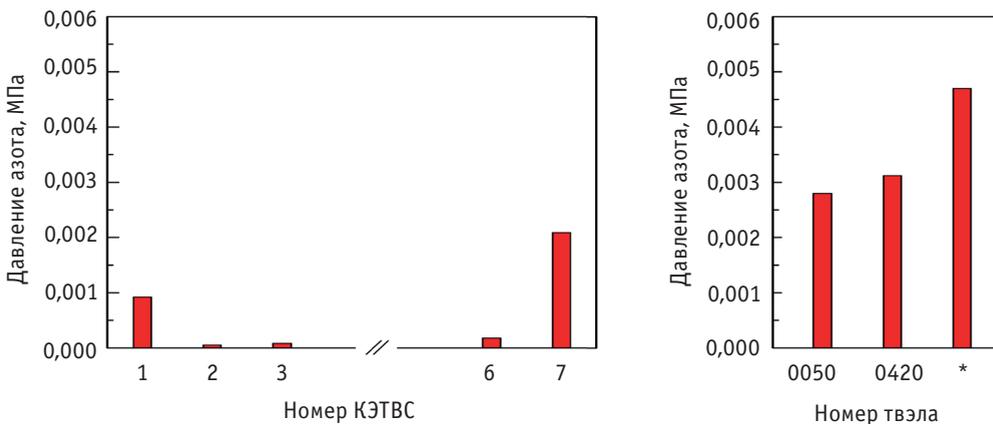


Рис. 1. Осредненные значения парциального давления азота под оболочкой всех нитридных твэлов КЭТВС-1, 2, 3, 6, 7 после облучения в реакторе БН-600, а также твэлов-свидетелей КЭТВС-6 № 0050 и № 0420; \* – расчетное значение давления азота при заполнении твэла гелием на 94%

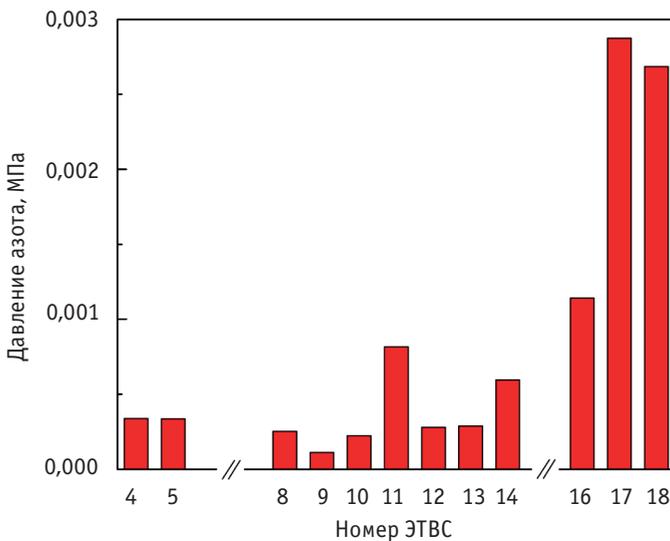


Рис. 2. Осредненные значения парциального давления азота под оболочкой всех нитридных твэлов ЭТВС после облучения в реакторе БН-600

## Результаты анализа экспериментальных данных

На рисунке 3 показаны значения парциального давления азота под оболочками твэлов в зависимости от выгорания топлива. Как видно, парциальное давление азота под оболочкой возрастает с ростом выгорания топлива. На рисунке 4 показано изменение парциального давления азота под оболочками исследованных твэлов в зависимости от массовой доли азота в топливе (паспортные данные).

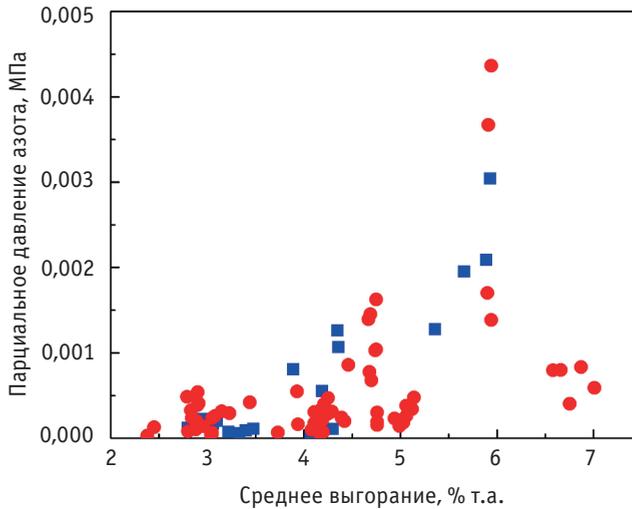


Рис. 3. Парциальное давление азота под оболочкой нитридных твэлов в зависимости от выгорания топлива: ■ – твэлы КЭТВС; ● – твэлы ЭТВС

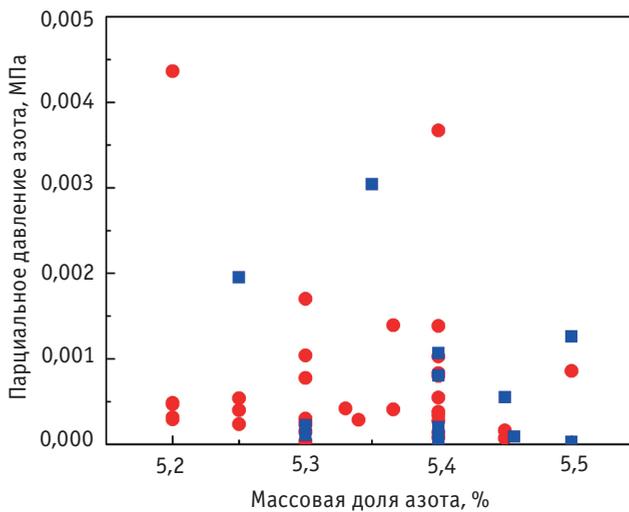


Рис. 4. Парциальное давление азота под оболочкой нитридных твэлов в зависимости от массовой доли азота в топливе: ■ – твэлы КЭТВС; ● – твэлы ЭТВС

Из приведенных данных следует, что

- во всех случаях за исключением твэлов № 99 КЭТВС-7, № 68 ЭТВС-17 и № 107 ЭТВС-18 парциальное давление азота под оболочкой облученных твэлов меньше исходного значения (давление азота в твэлах-свидетелях); для КЭТВС-6, КЭТВС-2 и КЭТВС-3 давление азота после облучения снизилось более чем в 10 раз по сравнению с исходным;

- парциальное давление азота под оболочками исследованных твэлов увеличивается с ростом выгорания топлива;

- парциальное давление азота под оболочками исследованных твэлов не зависит от массовой доли азота в смешанном нитридном топливе.

Проведенные измерения содержания азота под оболочкой твэлов показали, что в большинстве случаев парциальное давление азота в твэлах после облучения ниже исходного расчетного значения давления или давления в твэлах-свидетелях КЭТВС-6 (см. рис. 1, 2). Особенно это заметно для твэлов с наименьшими значениями выгорания топлива (КЭТВС-6, КЭТВС-2 и КЭТВС-3). В этих твэлах парциальное давление азота после облучения более чем на порядок ниже давления азота при изготовлении твэлов. Это означает, что азот, находящийся в твэле в газовой фазе, в самом начале облучения практически полностью взаимодействует с внутренним содержимым твэла (с топливным сердечником и (или) с материалом оболочки). В принципе, возможны оба этих процесса. Азотирование внутренней поверхности оболочки наблюдалось для большинства исследованных твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом [3]. При повышенных температурах газообразный азот может взаимодействовать с достехиометрическим нитридом урана [4]. Анализ паспортных данных по составу СНУП-топлива в исследованных ЭТВС показывает, что содержание азота в большинстве исследованных твэлов ниже точного стехиометрического состава, равного 5,55 масс.%.

Вместе с тем из рис. 3 следует, что с ростом выгорания СНУП-топлива количество азота под оболочкой твэлов увеличивается. Единственным источником азота в твэле является смешанный нитрид, в котором половину общего числа атомов составляют атомы азота. Одним из возможных механизмов выхода атомов азота в газовое пространство является их выбивание образующимися при делении атомов урана или плутония осколками деления [5, 6]. В отличие от атомов инертных газов (Kr, Xe, Ne), которые при достаточно высокой температуре могут свободно перемещаться в нитриде урана, атомы азота находятся в узлах кристаллической решетки, и их перемещение диффузионным путем ограничено. Тем не менее, атомы азота, которые находятся вблизи свободной поверхности, могут быть выбиты из топлива осколками деления и перейти в газовую фазу под оболочку твэла. На рисунке 5 этот процесс показан схематически, откуда видно, что в результате упругих столкновений с продуктами деления атомы решетки (уран, плутоний или азот) могут быть выбиты за поверхность нитрида. Интенсивность этого процесса определяется многими факторами, но наиболее важными из них являются скорость генерации осколков деления (скорость деления), длина пробега первично выбитых атомов и площадь открытой поверхности нитрида. При этом наибольшая неопределенность в расчетах скорости выбивания атомов азота из облученного смешанного нитрида связана с оценкой площади открытой поверхности топливных таблеток, находящихся в твэле. В исходном состоянии в твэле находится более сотни топливных таблеток с общей геометрической поверхностью

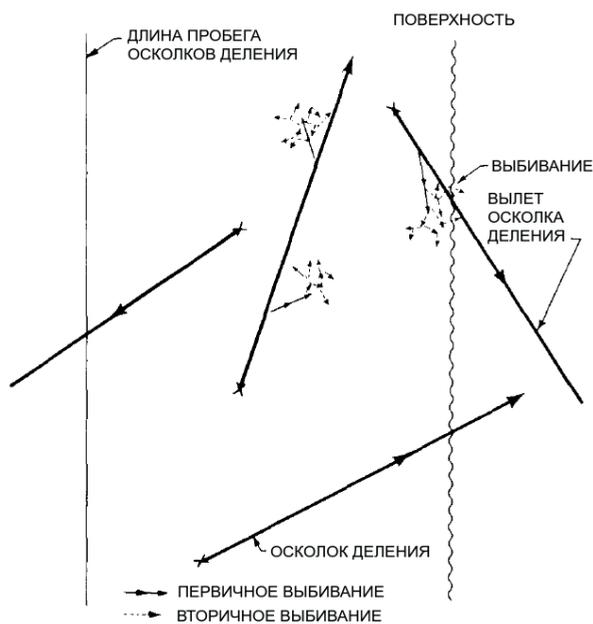


Рис. 5. Схема выбивания атомов из поверхностного слоя кристалла осколками деления [6]

приблизительно  $250 - 300 \text{ см}^2$ . Кроме этого, спеченные таблетки смешанного нитрида имеют открытую пористость, что также необходимо учитывать. В начальный период облучения при выходе реактора на мощность происходит фрагментация топливных таблеток, что в несколько раз увеличивает их открытую поверхность. При дальнейшем облучении в топливном сердечнике образуются газонаполненные поры в теле и на границе зерен. После достижения определенной величины выгорания поры, расположенные на границах зерен, соединяются в каналы, выходящие на поверхность топливной таблетки. Это существенно увеличивает поверхность, через которую атомы азота могут быть выбиты в газовое пространство твэла. Оценка количества азота, вышедшего под оболочку нитридных твэлов после облучения в реакторе БН-600, по зависимостям, приведенным в работах [5, 6], с учетом неопределенностей показывает неплохое соответствие с измеренными значениями давления азота в облученных твэлах.

Удельный выход азота из СНУП-топлива при схожих условиях во много раз меньше удельного выхода образующихся газообразных продуктов деления (ксенона и криптона) или гелия (рис. 6), что еще раз свидетельствует о том, что выход атомов азота происходит лишь из довольно тонкого поверхностного слоя топливных таблеток. Тем не менее, наличие азота под оболочкой твэла важно с точки зрения вопроса диссоциации смешанного нитрида при высоких температурах. Известно, что нитрид урана плавится конгруэнтно при температуре  $3100 \text{ К}$  и давлении азота  $2,5 \cdot 10^{-1} \text{ МПа}$  и выше, температура плавления уран-плутониевого нитрида несколько ниже  $\sim 3045 \text{ К}$  [7]. При более низком давлении азота нагрев нитрида до высокой температуры приводит к его диссоциации. Максимальная температура СНУП-топлива при нормальной эксплуатации реактора не превышает  $1500 - 1600^\circ\text{C}$ , что соответствует равновесному давлению азота над нитридом урана, равному  $\sim 6 \cdot 10^{-9} \text{ МПа}$  [8]. Добавление в замкнутую

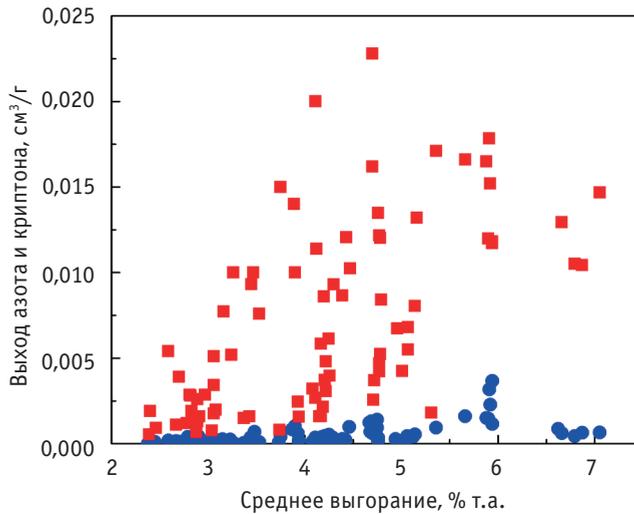


Рис. 6. Удельный выход криптона (■) и азота (●) из СНУП-топлива после облучения в реакторе БН-600

систему, какой является твэл, азота до давления  $\sim 2 \cdot 10^{-3}$  МПа будет сдвигать реакцию разложения нитрида урана в сторону более высоких температур, и равновесие в системе будет установлено уже при значительно более высокой температуре  $\sim 2400^\circ\text{C}$  [8]. Немногочисленные данные показывают, что при низких температурах давление азота над смешанным нитридом выше, чем над нитридом урана, однако с повышением температуры это различие уменьшается [9]. Таким образом, можно утверждать, что для герметичных твэлов, достигших выгорания топлива  $\geq 8\%$  т.а., выделение азота из смешанного уран-плутониевого нитрида будет дополнительным фактором, препятствующим его диссоциации.

## Заключение

Проведенные измерения содержания азота под оболочкой экспериментальных нитридных твэлов после их облучения в реакторе БН-600 показали, что в большинстве случаев парциальное давление азота в твэлах после облучения ниже исходного расчетного значения давления. Это означает, что азот, находящийся в твэле в газовой фазе, в самом начале облучения практически полностью взаимодействует с топливным сердечником и (или) с материалом оболочки.

Вместе с тем, проведенный в данной работе анализ результатов послереакторных исследований показал, что парциальное давление азота под оболочками исследованных твэлов увеличивается с ростом выгорания топлива, так как в результате облучения из смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под оболочку твэлов, кроме инертных газов криптона, ксенона и гелия, выходят также атомы азота. Механизмы выхода инертных газов и азота существенно различны: диффузионный механизм для инертных газов и выбивание осколками деления для азота. Различие в механизмах выхода газов приводит к существенному количественному различию выхода газов под оболочку. Удельный выход азота под оболочку твэлов значительно

ниже удельного выхода для остальных газов. Тем не менее, для герметичных твэлов, достигших выгорания  $\geq 8\%$  т.а., выделение азота из смешанного уран-плутониевого нитрида является дополнительным фактором, препятствующим его диссоциации.

### Литература

1. Поролло С.И., Иванов С.Н., Мариненко Е.Е., Забудько Л.М. Анализ экспериментальных данных о газовыделении и распухании облученного в реакторе БР-10 моноснитридного уранового топлива. *Атомная энергия*. 2016;121(6):326–332. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/308> (дата обращения 01.03.2025).
2. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Скупов М.В., Крюков Ф.Н., Теплов В.Г., Мариненко Е.Е., Поролло С.И. Выход газообразных продуктов деления из облученного смешанного нитридного уран-плутониевого топлива. *Атомная энергия*. 2020;129(2):111–114. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3445> (дата обращения 01.03.2025).
3. Поролло С.И., Мариненко Е.Е., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н., Гильмутдинов И.Ф., Забудько Л.М., Грачев А.Ф., Тарасов Б.А. Азотирование и науглероживание оболочки твэла со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом. *Атомная энергия*. 2022;133(2):88–92. URL: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/issue/view/414> (дата обращения 01.03.2025).
4. Некрасов Б.В. Учебник общей химии. М.: Госхимиздат, 1957, 486 с.
5. Olander D.R. Fundamental aspects of nuclear fuel elements. TID-26711-P1, 1976.
6. Ластман Б. Радиационные явления в двуокиси урана. М.: Атомиздат, 1985, 288 с.
7. Carvajal-Nunez U., Prieur D., Manara D. Melting point determination of uranium nitride and uranium plutonium nitride: A laser heating study. *J. Nucl. Mater.* 2014;449(1–3):1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.02.021>
8. Hayes S.L., Thomas J.K., Peddicord K.L. Material property correlation for uranium mononitride VI. Thermodynamic properties. *J. Nucl. Mater.* 1990;171(2–3):300–318. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(90\)90377-y](https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90377-y)
9. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Бергман Г.А., Прошкин А.А. Термохимическая стабильность, радиационные испытания и регенерация моноснитридного топлива. *Атомная энергия*. 2003;95(6):428–438.

Поступила в редакцию 06.03.2025

После доработки 16.04.2025

Принята к опубликованию 30.05.2025

### Авторы

Грачев Алексей Фролович, главный эксперт, д.т.н.,

E-mail: [gaf@npnroryv.ru](mailto:gaf@npnroryv.ru)

Забудько Людмила Михайловна, научный руководитель по разработке и обоснованию плотного топлива и КМ, к.т.н.,

E-mail: [zlm@npnroryv.ru](mailto:zlm@npnroryv.ru)

Мариненко Евгений Егорович, старший научный сотрудник,

E-mail: [emarinenko@ippe.ru](mailto:emarinenko@ippe.ru)

Поролло Сергей Иванович, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: [porollo@ippe.ru](mailto:porollo@ippe.ru)

Беляева Анна Викторовна, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: [avbelyaeva@niiar.ru](mailto:avbelyaeva@niiar.ru)

Крюков Федор Николаевич, заместитель директора отделения, д.ф.-м.н.,

E-mail: kryukov@niiar.ru

Теплов Вадим Геннадьевич, ведущий инженер,

E-mail: saurial@live.ru

Скупов Михаил Владимирович, заместитель генерального директора,

E-mail: MVSkupov@bochvar.ru

UDC 621.039.59

## Nitrogen under Cladding of Fuel Pins with Mixed Uranium-Plutonium Nitride

**Grachev A.F.<sup>1</sup>, Zabudko L.M.<sup>1</sup>, Marinenko E.E.<sup>2</sup>, Porollo S.I.<sup>2</sup>, Belyaeva A.V.<sup>3</sup>, Kryukov F.N.<sup>3</sup>, Teplov V.G.<sup>3</sup>, Skupov M.V.<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Proryv JSC,

1 Ramenskiy Boulevard, 119607 Moscow, Russia,

<sup>2</sup> IPPE JSC,

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

<sup>3</sup> NIIAR JSC,

9 Zapadnoe Sh., 433510, Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia

<sup>4</sup> VNIINM JSC,

5a Rogov St., 123098, Moscow, Russia

### Abstract

In gas-bonded fuel pins the interior space is filled with helium in order to provide heat removal from the fuel. Under irradiation, as a result of gaseous fission products release, the initial gas composition under the fuel pin cladding changes, which leads to a change in its thermophysical characteristics. Post-irradiation examinations have shown that the partial pressure of nitrogen under the fuel pin cladding increases with fuel burn-up increase, since nitrogen atoms also release from uranium-plutonium nitride fuel under the cladding, in addition to the krypton, xenon and helium inert gases. The mechanisms of release of inert gases and nitrogen from nitride are different: the diffusion mechanism for inert gases and the knocking out of fission fragments for nitrogen. The difference in the gas release mechanisms leads to a significant quantitative difference in the gases release under the cladding. The specific nitrogen yield under the fuel pin cladding is significantly lower than the specific yield of other gases, but its presence is an important factor, since the dissociation temperature of the mixed nitride, as well as the nitriding of the inner surface of the cladding, depends on the nitrogen pressure under the fuel pin cladding. A generalization and analysis of the results of post-irradiation examinations of the nitrogen content in the gas mixture under the claddings of 87 investigated fuel pins after irradiation in the BN-600 reactor as part of 17 experimental fuel assemblies with mixed uranium-plutonium nitride fuel, irradiated to maximum fuel burn-up from 3 at.% to 9 at.% is carried out in the paper.

**Keywords:** mixed uranium-plutonium nitride fuel, experimental fuel pins, experimental fuel assemblies, post-irradiation examination, nitrogen partial pressure, fission gas products, cladding nitriding, inert gases.

**For citation:** Grachev A.F., Zabudko L.M., Marinenko E.E., Porollo S.I., Belyaeva A.V., Kryukov F.N., Teplov V.G., Skupov M.V. Nitrogen under Cladding of Fuel Pins with Mixed Uranium-Plutonium Nitride. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;2:40–49; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.2.04> (in Russian).

## References

1. Porollo S.I., Ivanov S.N., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Analysis of Experimental Data on Gas Release and Swelling of Uranium Mononitride Fuel Irradiated in the BR-10 Reactor. *Atomic Energy*. 2017;121(6):415–423. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0221-4>
2. Grachev A.F., Zabudko L.M., Skupov M.V., Kryukov F.N., Teplov V.G., Marinenko E.E., Porollo S.I. Fission Gas Release from Irradiated Uranium-Plutonium Nitride Fuel. *Atomic Energy*. 2020;129(2): 103–107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00712-z>
3. Porollo S.I., Marinenko E.E., Kryukov F.N., Nikitin O.N., Gilmutdinov I.F., Zabudko L.M., Grachev A.F., Tarasov B.A. Nitriding and Carburization of a Mixed Nitride Uranium-Plutonium Fuel Pin Cladding. *Atomic Energy*. 2022;133(3):92–97. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-023-00978-5>
4. Nekrasov B.V. Textbook of general chemistry. Moscow, Goshimizdat, 1957, 486 p. (in Russian).
5. Olander D.R. Fundamental aspects of nuclear fuel elements. TID-26711-P1, 1976.
6. Lustman B. Radiation phenomena in uranium dioxide. Moscow, Atomizdat, 1985, 288 p. (in Russian).
7. Carvajal-Nunez U., Prieur D., Manara D. Melting point determination of uranium nitride and uranium plutonium nitride: A laser heating study. *J. Nucl. Mater.* 2014;449(1–3):1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.02.021>
8. Hayes S.L., Thomas J.K., Peddicord K.L. Material property correlation for uranium mononitride VI. Thermodynamic properties. *J. Nucl. Mater.* 1990;171(2–3):300–318. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(90\)90377-y](https://doi.org/10.1016/0022-3115(90)90377-y)
9. Rogozkin B.D., Stepenova N.M., Bergman G.A., Proshkin A.A. Thermochemical Stability, Radiation Testing, Fabrication, and Reprocessing of Mononitride Fuel. *Atomic Energy*. 2003;95(6):835–844. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:ATEN.0000018996.79185.bc>

## Authors

Aleksey F. Grachev, Chief Expert, Dr. Sci. (Engineering),

E-mail: [gaf@pnproryv.ru](mailto:gaf@pnproryv.ru)

Liudmila M. Zabudko, Scientific Supervisor, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [zlm@pnproryv.ru](mailto:zlm@pnproryv.ru)

Evgeny E. Marinenko, Senior Researcher,

E-mail: [emarinenko@ippe.ru](mailto:emarinenko@ippe.ru)

Sergey I. Porollo, Leading Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [porollo@ippe.ru](mailto:porollo@ippe.ru)

Anna V. Belyaeva, Senior Researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: [avbelyaeva@niiar.ru](mailto:avbelyaeva@niiar.ru)

Feodor N. Kryukov, Deputy Head of Department, Dr. Sci. (Phys.-Math.),

E-mail: [kryukov@niiar.ru](mailto:kryukov@niiar.ru)

Vadim G. Teplov, Leading Engineer,

E-mail: [saurial@live.ru](mailto:saurial@live.ru)

Mikhail V. Skupov, Deputy Director General,

E-mail: [MVSkupov@bochvar.ru](mailto:MVSkupov@bochvar.ru)