

УДК 621.039.548 DOI:

<https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.11>  
Оригинальная статья / Original paper

## Реакторные испытания экспериментальных ТВЭЛов в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) в канале реактора МИР.М1

А.Л. Ижutow, О.И. Дреганов, И.В. Киселева, А.В. Алексеев, Н.П. Котов, Я.А. Сулягина,  
Е.И. Полетаев, А.Н. Маркелов

АО «ГНЦ НИИАР»,

Россия 433510, Ульяновская обл., г. Димитровград, Западное ш., 9

**Реферат.** Актуальность исследования обусловлена необходимостью обоснования безопасности эксплуатации реакторных установок при авариях с потерей теплоносителя (LOCA), что является ключевым требованием федеральных норм и правил в области атомной энергетики. Представлена методика проведения реакторных испытаний экспериментальных ТВЭЛов в условиях LOCA на исследовательском реакторе МИР.М1. Разработаны алгоритм проведения эксперимента и температурный сценарий, обеспечивающие моделирование второй стадии LOCA – осушения активной зоны и разгерметизации ТВЭЛов, а также третьей стадии – термоудара холодной водой. Приведены конструктивные решения облучательного устройства и рефабрикованного ТВЭЛ, оснащенного датчиком давления и термоэлектрическими преобразователями на оболочке, размещенными на различных высотных участках, позволяющие в реальном времени контролировать давление газа внутри ТВЭЛ и температуру оболочки. С 2014 г. выполнена серия экспериментов на ТВЭЛх различного конструктивного исполнения, выгорания и состава топлива, изучены процессы разгерметизации, раздутия оболочки, фрагментации и релокации топлива. Методика обеспечивает безопасное проведение экспериментов, предотвращает загрязнение первичного контура. Полученные данные применяются для оценки термомеханического состояния ТВЭЛов, обоснования безопасности реакторных установок, верификации расчетных кодов и пополнения экспериментальной базы.

**Ключевые слова:** LOCA, исследовательский реактор МИР.М1, тепловыделяющий элемент, разгерметизация ТВЭЛ, раздутие оболочки, фрагментация топлива, релокация топлива, термоудар, температура оболочки, давление газа, облучательное устройство, активная зона.

**Для цитирования:** Ижutow А.Л., Дреганов О.И., Киселева И.В., Алексеев А.В., Котов Н.П., Сулягина Я.А., Полетаев Е.И., Маркелов А.Н. Реакторные испытания экспериментальных ТВЭЛов в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA) в канале реактора МИР.М1. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2026;2:174–189. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.11>

© Ижutow А.Л., Дреганов О.И., Киселева И.В., Алексеев А.В., Котов Н.П., Сулягина Я.А., Полетаев Е.И., Маркелов А.Н., 2026

## Введение

В соответствии с требованиями нормативных документов для лицензирования эксплуатации на атомной станции новых видов топлива и конструкционных материалов необходимо обосновать безопасность их использования не только при нормальных режимах работы, но и в условиях проектных аварий. Данное обоснование невозможно без проведения стендовых и реакторных испытаний.

Определяющей по степени воздействия на состояние твэлов и радиационную обстановку атомной станции является авария LOCA – авария с большой течью теплоносителя, возникающей при гильотинном разрыве главного циркуляционного трубопровода в водо-водяном реакторе под давлением. Поэтому перед авторами стояла цель разработать методику проведения в реакторе МИР испытаний в условиях аварии LOCA, чтобы изучить поведение одиночных твэлов: определить параметры их разгерметизации (температуру оболочки, давление в твэле), состояние топливных таблеток (фрагментацию, диспергирование, релокацию, выброс топливных частиц в теплоноситель при разгерметизации твэла) и оболочки (деформацию, двухстороннее окисление, охрупчивание). При разработке методики научным, инженерным и конструкторским коллективами решены частные задачи по разработке

- температурного сценария, характерного для процесса протекания аварии LOCA в водо-водяном реакторе под давлением (ВВЭР, PWR и других);
- алгоритма проведения эксперимента LOCA с обоснованием соблюдения условия ядерной и радиационной безопасности для реактора МИР;
- облучательного устройства и вспомогательного стендового оборудования;
- для испытания одиночного твэла с реализацией требуемых условий протекания стадий нестационарного процесса аварии LOCA (определение номенклатуры средств и методов измерения параметров эксперимента, в том числе максимальной температуры оболочки в процессе испытаний);
- схемы формирования активной зоны реактора МИР, чтобы создать стартовые условия для испытания твэлов.

## Сценарий протекания аварии LOCA

Протекание LOCA при гильотинном разрыве главного циркуляционного трубопровода (Ди 850 мм) на реакторе ВВЭР можно разделить условно на три стадии [1–3], показанные на рис. 1.

Первая стадия длительностью до 90 сек связана с процессом спада давления в первом контуре и соответственно возникновением кризиса теплоотдачи 1-го рода, за счет чего наблюдается кратковременный резкий рост температуры оболочки до 800–1000°C в зависимости от энерговыделения в твэле. Раздутие оболочки на первой стадии не наблюдается из-за наличия все еще спадающего давления в контуре.

Вторая стадия, длительность которой около 300 сек, начинается с момента, когда давление в контуре упало до атмосферного и развивается процесс осушения активной зоны (попадания твэлов в кризис теплоотдачи 2-го рода). Наибольшее число твэлов, претерпевших раздутие оболочки, разгерметизацию и формоизменение, прогнозируется именно на второй стадии из-за того, что оболочка твэла начинает

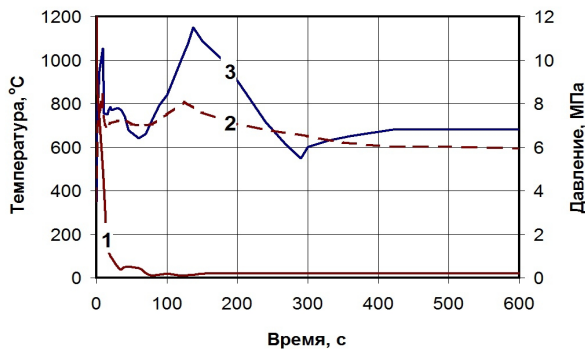


Рис. 1. Сценарий протекания аварии типа LOCA в водородном реакторе под давлением с указанием стадий и параметров: давления теплоносителя (1) и температуры твэлов при линейной мощности 360 (2) и 450 (3) Вт/см

раздуться под действием давления внутритвэльных газов (перепад давления на оболочке возрастает до 4 – 6 МПа). Именно моделирование второй стадии представляет наибольший интерес с точки зрения интегрального изучения поведения твэлов в условиях LOCA и влияния разрушения твэла на радиационную обстановку АС.

Третья стадия связана с процессом залива активной зоны из САОР холодной водой – возникновением термоудара на оболочке с дальнейшим длительным расхолаживанием.

Разработанная методика позволяет моделировать вторую и третью стадии переходного процесса LOCA: для определения параметров разгерметизации, состояния топливного сердечника и оболочки твэла в условиях осушения и термоудара соответственно.

## Методика эксперимента LOCA

Методика проведения реакторных испытаний твэлов в условиях второй и третьей стадий LOCA включает в себя

- температурный сценарий, определяющий цели и задачи отдельного эксперимента по изучению поведения исследуемого твэла;
- разработку конструкции облучательного устройства;
- разработку конструкции рефабрированного твэла, оснащенного датчиком давления;
- определение номенклатуры и количества датчиков контроля параметров;
- алгоритм проведения эксперимента на реакторе МИР;
- требования по формированию активной зоны реактора.

В период 2001 – 2010 гг. на реакторе МИР проводились испытания (серия экспериментов «Большая течь») в режиме LOCA на пучке из 19-ти твэлов с целью изучения процесса деформации оболочки твэлов и, соответственно, перекрытия проходного сечения в ТВС [4, 5]. Основной вывод, который был сделан на экспериментах серии «Большая течь», – уменьшение проходного сечения для теплоносителя в активной зоне не превышает 30%, при этом обеспечено достаточное охлаждение твэлов. Свойства материала оболочки, которые определяют ее целостность, сохраняются на высоком уровне.

С 2014 г. приоритетной задачей стало исследование поведения твэла в условиях аварии LOCA как отдельного элемента активной зоны реактора. Поэтому была разработана конструкция облучательного устройства (ОУ), которая позволяет устанавливать исследуемый твэл по центральной оси канала. При таком расположении твэла отсутствует неравномерность температуры оболочки по азимуту.

Особенностью испытаний в реакторе МИР.М1 является испытание укороченных твэлов длиной 1 м, что связано с высотой активной зоны реактора. Этой длины экспериментального твэла достаточно для моделирования поведения твэла в аварии с потерей теплоносителя, так как раздутие оболочки в реальной аварии происходит на ограниченном участке длины (между дистанционирующими решетками), что возможно полностью воспроизвести на длине 1 м. Здесь важным является смоделировать шаг между решетками как в реакторах ВВЭР для подобия термомеханических напряжений на оболочке твэла.

## Особенности конструкции ОУ и датчики контроля параметров эксперимента

На рисунке 2 представлена схема ОУ в виде ампулы, в объеме которой организованы стартовые условия, моделирующие вторую и третью стадии аварийного процесса LOCA. Данная конструкция имеет следующие особенности:

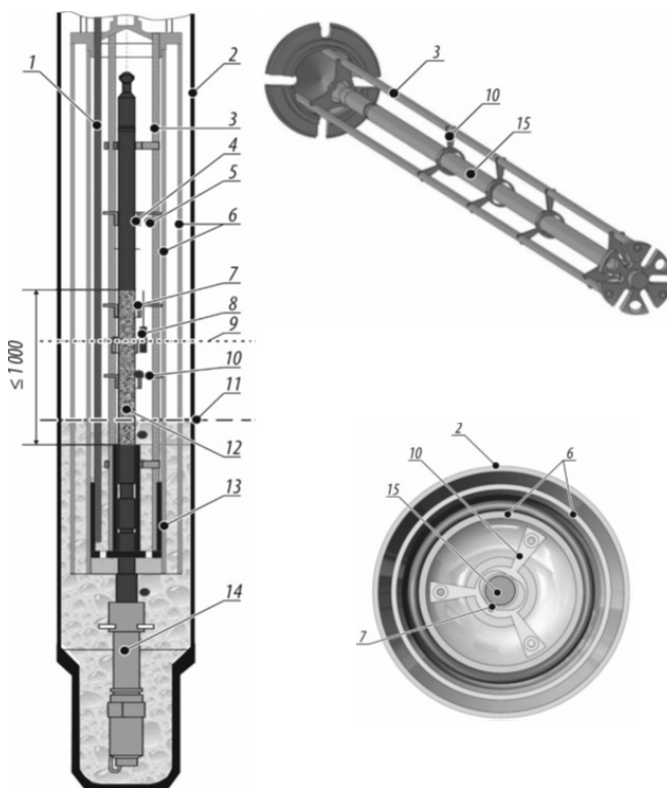


Рис. 2. Конструктивная схема ОУ с твэлом: 1 – трубка для залива воды; 2 – корпус ампулы; 3 – несущая корзина; 4 – термоэлектрический преобразователь на оболочке в области газосборника; 5 – термоэлектрический преобразователь в теплоносителе; 6 – съемная теплоизолирующая обечайка в модернизированном ОУ; 7 – термоэлектрический преобразователь на оболочке в области топлива; 8 – детектор прямого заряда для контроля изменения относительного энерговыделения; 9 – центральная плоскость активной зоны; 10 – дистанционирующий элемент с креплением под термоэлектрический преобразователь; 11 – уровень воды (около 150–200 мм от нижнего торца топливного сердечника), выше уровня воды – пароаргоновая смесь; 12 – топливный сердечник; 13 – проставка для сбора топливной крошки; 14 – датчик измерения давления; 15 – твэл

- исследуемый твэл оснащен датчиком дифференциально-трансформаторного типа для измерения давления, что позволяет в режиме реального времени контролировать и регистрировать изменение давления внутри твэла, фиксировать момент вздутия оболочки и разгерметизации;
- внутренняя полость в ампуле изолирована от теплоносителя петлевой установки (ПУ) реактора корпусом толщиной 3 мм, что позволяет безопасно проводить реакторные испытания, связанные с потенциальным выходом топливных частиц в теплоноситель;
- охлаждение твэла осуществляется, в основном, излучением, а также паром, генерируемым частью топливного фрагмента твэла, погруженного в воду;
- импульсные линии, выходящие из объема ампулы, позволяют обеспечить давление внутри ампулы около 1 атм (0,1 МПа), что соответствует спаду давления в зоне реактора ВВЭР при аварии, т.е. началу второй стадии аварии LOCA,
- организовать подачу холодной воды для создания условий термошока, что характерно для третьей стадии аварийного процесса;
- разработанная конструкция корзины и дистанционирующих элементов позволяет устанавливать облученные твэлы в условиях радиационно-защитной камеры, обеспечивая прижатие термоэлектрических преобразователей к оболочке твэла в нескольких точках по высоте топливной части, при этом исключается механическое и термическое негативное воздействие на оболочку;
- съемная теплоизолирующая обечайка в активной части, примененная в конструкции модернизированного в 2022 г. ОУ, или электронагреватель, характерный для первой конструкции устройства, обеспечивают стартовые температурные условия водо-водяного реактора под давлением.

Объем и номенклатура средств контроля и измерения параметров в ОУ выбираются исходя из достаточности при определении условий испытания твэла, от которых будет зависеть его термомеханическое состояние. В ОУ могут быть установлены датчики, позволяющие в режиме реального времени измерять следующие параметры:

- давление газов под оболочкой исследуемого твэла;
- температуру оболочки твэла в нескольких точках по высоте топливной части;
- температуру теплоносителя (воды) на входе в активную часть и на выходе (водяного перегретого пара) из активной части ОУ;
- относительное энерговыделение, которое измеряется детектором прямого заряда (ДПЗ), установленным непосредственно в объеме ОУ, и штатными ионизационными камерами (ИК) реактора.

Модернизация конструкции ОУ в 2022 г. за счет отказа от использования электронагревателя и разработки узла многократного использования – теплоизолирующей обечайки – позволила упростить проведение работ по сборке и разделке и обеспечить надежный визуальный контроль установки твэла в корзину в условиях радиационно-защитной камеры (РЗК). Проведенные эксперименты LOCA-PWR/М-63 (в 2023 г.) и LOCA-PWR-USi/30(2) (в 2024 г.) с использованием модернизированной ОУ показали надежность и работоспособность усовершенствованной конструкции.

## Измерение давления и температуры оболочки твэла

При проведении экспериментов LOCA одним из важных контролируемых параметров является давление газов внутри твэла, измерение которого обеспечивается

каналом измерения давления, состоящего из дифференциально-трансформаторного преобразователя (ДТП), сильфонного узла (СУ) (неотъемлемая часть твэла) и блока вторичного преобразователя (БВП).

На рисунке 3 представлена конструктивная схема исследуемого рефабрикованного твэла, оснащенного СУ датчика давления.

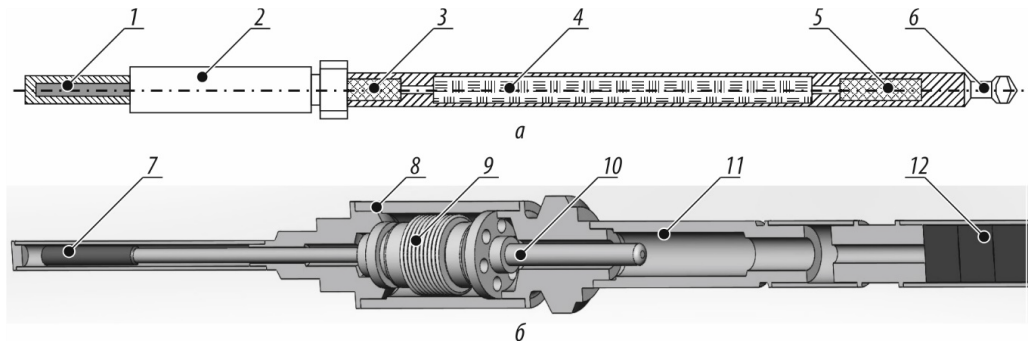


Рис. 3. Конструктивная схема исследуемого рефабрикованного твэла (а), оснащенного сильфонным узлом (б) датчика измерения давления: 1 – магнитный сердечник сильфонного узла; 2 – сильфонный узел; 3 – нижний свободный газовый объем; 4 – топливный сердечник; 5 – верхний свободный газовый объем; 6 – верхняя заглушка с ниппелем для заполнения газа и герметизации твэла; 7 – шток с ферромагнитным сердечником; 8 – корпус сильфонного узла (из нержавеющей стали); 9 – чувствительный элемент (сильфон с противодавлением); 10 – капилляр для заполнения сильфона противодавлением; 11 – переходник между сталью и цирконием; 12 – топливная часть твэла (топливо и оболочка)

Основные характеристики системы измерения давления внутри твэла на основе дифференциально-трансформаторного преобразователя:

Измеряемое избыточное давление, зависящее от типа сильфона – 2 – 7 МПа.

Условия эксплуатации

- дифференциально-трансформаторного преобразователя:
  - температура – до 300°C
  - давление – 0,1 – 16,5 МПа
  - среда – газ, вода, пар
- блока вторичного преобразователя и измерительных приборов:
  - температура воздуха –  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$
  - влажность воздуха – не более 60 %
  - давление воздуха –  $(760 \pm 30)$  мм рт. ст. [ $(0,1013 \pm 0,004)$  МПа]
- сильфонного узла:
  - противодавление газа во внутренней полости при температуре 20°C –  $3,0 \pm 0,04$  МПа;
  - диапазон измерения давления и чувствительность, зависящие от марки сильфона – марка S-159-60-117
- приведенная неопределенность датчика измерения давления, %:
  - основная  $\pm 0,67$ ;
  - дополнительная  $\pm 0,42$ .

Разработчиком и изготовителем данного типа датчика является АО «ГНЦ НИИАР»; кроме того каждый датчик давления проходит индивидуальную калибровку с выпуском протокола калибровки, соответствующего паспорта и сертификата.

Для измерения температуры оболочки твэла был разработан специальный узел крепления ТЭП, основное преимущество которого в том, что отсутствует механическое или термическое влияние на оболочку в области деформации. Конструкция решетки разработана таким образом, чтобы «пятно» контакта с оболочкой было минимальным – в одной точке, и вторая точка – это непосредственный контакт оболочки с ТЭП, кабель которой уже проходит через решетку (см. рис. 2). Эта конструкция позволяет оболочке твэла в процессе моделирования второй стадии LOCA не препятствовать процессу деформирования оболочки твэла.

Однако данный способ имеет недостаток, а именно – необходимо учитывать поправку в определении максимальной температуры оболочки из-за влияния решетки как радиатора. Ранее на лабораторном стенде проводилось изучение термометрической характеристики узла крепления ТЭП, где была определена величина поправок в зависимости от места расположения рабочего спая [6]. Все ТЭП, используемые в экспериментах, проходят индивидуальную калибровку во всем диапазоне предполагаемого измерения. Все датчики контроля параметров подключены к автоматизированной системе научных исследований (АСНИ).

## Создание условий термоудара – третьей стадии LOCA

Для реализации условий термоудара – залива холодной воды с температурой до  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  с подъемом уровня воды в ОУ снизу со скоростью до 0,2–0,3 м/с – было разработано дополнительное оборудование (рис. 4), в которое входят стенд с отсечными вентилями, металлорукав высокого давления; гидроаккумулятор, представляющий собой бак с манометром, заполненный водой, и баллон с аргоном для создания давления.

Данный стенд также используется на этапе подготовки к эксперименту для продувки внутреннего объема ОУ аргоном для вытеснения воздуха при необходимости.

На рисунке 4 показана выведенная импульсная линия (трубка для отвода пароаргоновой среды) ОУ в бассейн реактора, которая обеспечивает поддержание давления на протяжении всего эксперимента на уровне атмосферного.

## Алгоритм, параметры и особенности проведения эксперимента LOCA на реакторе МИР.М1

Разработанная конструкция ОУ позволяет обеспечить следующие параметры температурного сценария проведения экспериментов, характерные для второй и третьей стадий переходного процесса LOCA:

- максимальная температура оболочки твэла до  $1200^\circ\text{C}$ ;
- скорость разогрева оболочки от 0,5 до  $5^\circ\text{C}/\text{с}$ ;
- величина термошока от  $500$  до  $800^\circ\text{C}$  в зависимости от заданной целевой максимальной температуры;
- перепад давления на оболочке твэла до 7 МПа;
- начальное заполнение твэла газом (при  $0^\circ\text{C}$ ) до 3,9 МПа.

Алгоритм проведения экспериментов LOCA на реакторе МИР.М1 состоит из следующих этапов.

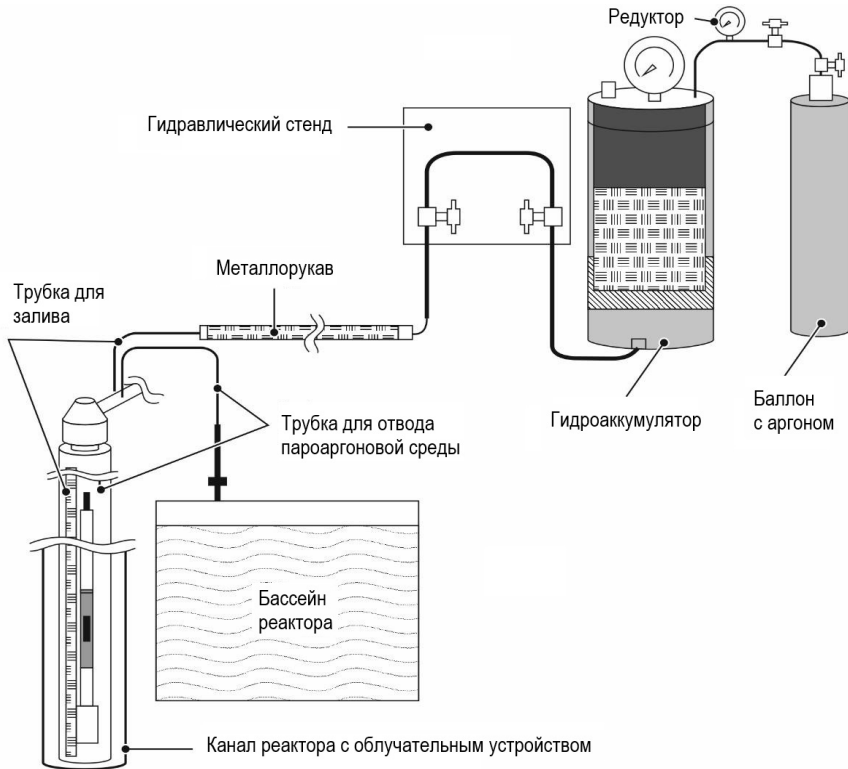


Рис. 4. Схема подключения ОУ к дополнительному оборудованию для создания условий термоудара

1. Вывод реактора в режим работы авторегулятора. Температура оболочки прогнозируется в диапазоне до  $350^{\circ}\text{C}$ .

2. Включение электронагревателя (справедливо для ОУ до модернизации). Выдержка на уровне мощности для создания начального расхода пара.

3. Разогрев оболочки до максимальной целевой температуры или до наступления разгерметизации с заданной скоростью путем непрерывного повышения мощности реактора.

4. При достижении максимальной целевой температуры или разгерметизации оболочки твэла реактор переводится в режим останова нажатием кнопки аварийной защиты.

5. При снижении температуры до заданной условием сценария в ОУ подается холодная вода – реализуется термоудар.

Длительное расхолаживание твэла происходит в водной среде ампулы без циркуляции.

Особенностью проведения испытаний LOCA является формирование активной зоны реактора, которое заключается в создании существенного перекаса энерговыделения по активной зоне [7]. Это позволяет при выводе реактора в режим работы автоматического регулирования мощности обеспечить минимально возможную температуру на оболочке твэла до  $350^{\circ}\text{C}$  в условиях отсутствия водного принудительного охлаждения для того, чтобы обеспечить стартовые параметры твэла, характерные для водо-водяного реактора под давлением.

## Проведенные эксперименты и их основные результаты

При проведении экспериментов LOCA по представленной методике в канале реактора МИР.М1 в режиме реального времени получают данные по динамике температуры оболочки и давления заполняющего газа при разогреве и охлаждении твэла во время термоудара, изменению относительного энерговыделения в канале, а также по разгерметизации твэла в случае ее достижения.

На рисунке 5 продемонстрировано изменение регистрируемых параметров в процессе проведения одного из экспериментов. По данным изменения давления можно видеть начало раздутия оболочки и момент разгерметизации твэла. Также по показаниям одной из термпар был зафиксирован провал по температуре, соответствующий моменту раздутия оболочки. Максимальная температура с учетом посттестовых расчетных исследований составила в эксперименте чуть более  $1200^{\circ}\text{C}$ , что соответствовало техническим требованиям к эксперименту. Резкое падение показаний ТЭП до  $100^{\circ}\text{C}$  указывает на реализацию условий термоудара на оболочке твэла.

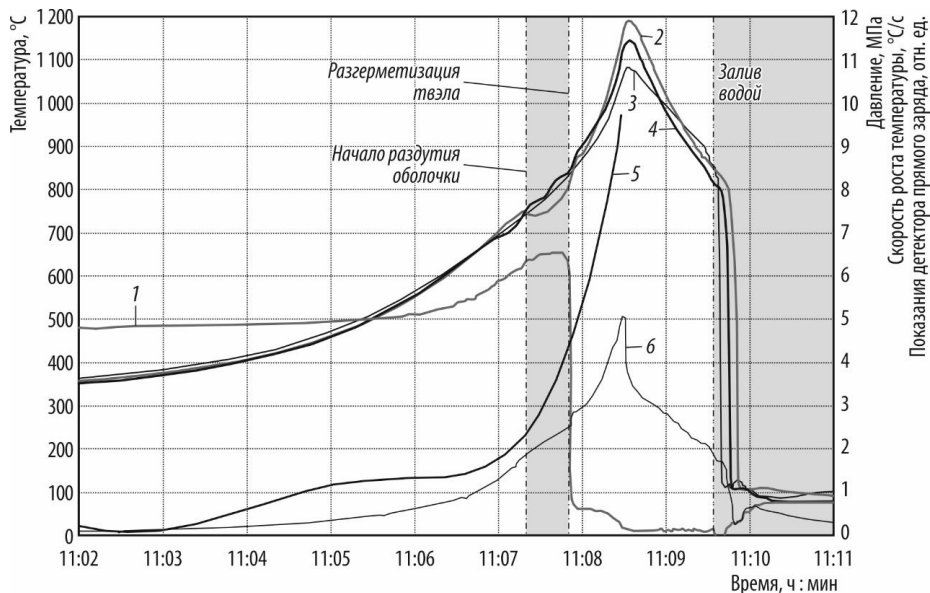


Рис. 5. Изменение параметров испытаний в процессе эксперимента LOCA: давления газа под оболочкой (1), максимальной температуры оболочки (2), ее температуры области нижней (3) и центральной (4) решетки, скорости роста температуры оболочки (5), показаний детектора прямого заряда (6)

Показания ИК служат для получения динамики относительной мощности, которая используется для посттестовых расчетов.

С использованием данной методики с 2014 г. проведено восемь экспериментов с твэлами, отличающимися глубиной выгорания топлива, конструктивным исполнением топливной таблетки (с центральным отверстием и без него) и ее композиции, оболочками (как по геометрии, так и по модификации циркониевых сплавов). В каждом эксперименте были достигнуты свои целевые параметры (табл. 1).

Таблица 1

### Основные параметры реакторных экспериментов LOCA в реакторе МИР

Параметр	Эксперимент							
	МИР-LOCA / 72 [8]	МИР-LOCA / 45 [9, 10]	МИР-LOCA / 69 [11]	LOCA-РЕМИКС [12]	МИР-LOCA-Gd / 50 [13]	LOCA-PWR / ATF-0 [14]	LOCA-BBЭP / ATF-0	LOCA-PWR / M-63
Год проведения	2014	2016		2020	2022			2023
Твэл реактора	BBЭP					PWR	BBЭP	
Объект испытания	Твэл штатной конструкции	Твэл новой конструкции с повышенной ураноемкостью		Твэл с РЕМИКС-топливом	Твэл с массовой долей гадолиния 8%	Твэл с ATF-топливом на основе дисилицида урана		Твэл штатной конструкции
Материал оболочки	3110							Э110М
Состав топлива	Оксид урана			Оксиды урана и плутония	Оксиды урана и гадолиния	Дисилицид урана		Оксид урана
Длина топливного сердечника, мм	1002	1001	1003	490	900	926	429	649
Выгорание, МВт сут/кг урана	77,7	45,3	69,3	51,5	53,6	0		69,3
Целевая температура оболочки, °С	1 000 – 1 200	800 – 820	700 – 750	750 – 800	800 – 900			1000 – 1200
Скорость разогрева, °С/с	3 – 5	1 – 4		2 – 4	1,5 – 4			0,5 – 1

В таблице 2 показаны основные результаты экспериментов LOCA, проведенных в реакторе МИР: параметры разгерметизации твэлов, достигнутые значения температуры и давления, описано, когда наблюдали раздутие, разгерметизацию твэла, приведено изменение окружной деформации по результатам материаловедческих исследований.

После проведения реакторного эксперимента в РЗК методами неразрушающего контроля определяют внешний вид твэла (см. рис. 5), величину и распределение по высоте деформации оболочки, количество и состав газа под оболочкой твэла (в случае сохранения герметичности) и другие параметры, которые характеризуют термомеханическое состояние тепловыделяющего элемента. На отдельных образцах, вырезанных из твэла, прошедшего испытание в канале исследовательского реактора, определяют степень окисления оболочки, содержание водорода, распределение гидрида циркония в материале и механические свойства. На основании результатов,

## Основные результаты реакторных экспериментов LOCA в реакторе МИР.М1

Параметр	Эксперимент							
	МИР-LOCA / 72 [8]	МИР-LOCA / 45 [9, 10]	МИР-LOCA / 69 [11]	LOCA-РЕМИКС [12]	МИР-LOCA-Gd / 50 [13]	LOCA-PWR / ATF-0 [14]	LOCA-ВВЭР / ATF-0	LOCA-PWR / M-63
Раздутие оболочки	Есть							
Деформация, %	46	25	10	9	35	65	57	99,5
Число разрывов	2	1	–		1			
Параметры разгерметизации: максимальная температура оболочки, °С	830	770	–		830	822	806	724
перепад давления на оболочке, МПа	6,41	4,81	–		4,8	4,21	4,71	4,64
максимальная скорость разогрева, °С/с	4,0	3,2	–		1,7	2,5	2,5	6–7
линейная мощность твэла, Вт/см	31	16	–		19	22	16	24
Максимально достигнутые значения: температуры оболочки, °С	1 145	807	748	820	842	863	877	903
перепада давления на оболочке, МПа	6,41	4,81	5,8	5,19	5,2	5,02	5,74	5,6
скорости разогрева, °С/с	9,1	4,2	1,2	2,4	2,3	3,3	3,8	6–7
линейной мощности, Вт/см	63	22	15	18	20	24	16	29,7

полученных непосредственно в реакторе и при посттестовых исследованиях, делают вывод о состоянии твэла после испытания.

## Заключение

Разработанная и внедренная методика проведения экспериментов LOCA показала ряд существенных преимуществ:

- проведение экспериментов с рефабрикованным твэлом, оснащенным датчиком давления, позволяет в процессе эксперимента отследить изменение давления внутри твэла и зафиксировать момент раздутия и разгерметизации оболочки; наличие термодар, установленных в решетках, позволяет оценить максимальную температуру и отследить в динамике ее изменение, не оказывая негативное воздействия на оболочку;
- облучательное устройство выполнено в виде ампулы, что позволяет исключить загрязнение ПУ реактора МИР.М1 топливными частицами при разрушении твэла; наличие импульсных линий в ОУ позволяет гарантированно обеспечить давление снаружи твэла на уровне одной атмосферы и реализовать термоудар;

- модернизированная конструкция ОУ в 2022 г. позволила гарантированно производить установку облученного твэла в условиях РЗК, обеспечивая визуальный контроль касания термопарой оболочки;
- существенно уменьшен объем работ, связанных с количеством изготовленных экспериментальных твэлов, а также временем подготовки петлевой установки до испытаний и по обращению после разгерметизации твэлов в сравнении с экспериментами серии «Большая течь».

Все полученные результаты серии экспериментов типа LOCA в реакторе МИР.М1 использованы для обоснования безопасности поведения твэлов в аварийных условиях, верификации расчетных кодов и пополнения базы экспериментальных данных. Получены результаты, полностью соответствующие техническим требованиям к проведению испытаний.

Таким образом, разработана и внедрена методика реакторных испытаний на ИЯУ МИР.М1 экспериментальных твэлов с моделированием условий аварии с потерей теплоносителя (LOCA) водо-водяных реакторов под давлением, которая существенно расширила опытно-экспериментальную базу АО «ГНЦ НИИАР».

В настоящее время до 2028 г. по разработанной методике с использованием модернизированной конструкции ОУ на реакторе МИР.М1 запланировано проведение серии экспериментов LOCA на твэлах с разными видами топлива и разными материалами оболочек. Также будут получены результаты на твэлах с оболочками из циркониевого сплава с нанесенным покрытием из хрома.

## Литература

1. Спассков В.П., Шумский А.М., Семишкин В.П., Шулимов В.Н., Дреганов О.И., Киселева И.В. Реакторные исследования аварийного поведения активной зоны ВВЭР на петлевой установке ПВП-2 реактора МИР.М1. В сб. докл. междунар. конф. «Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР. Теплофизика-98». Обнинск, ГНЦ РФ – ФЭИ, 1998, т. 2, с. 42 – 51.
2. Мохов В.А., Махин В.М., Семишкин В.П. Приемочные критерии разгерметизации твэлов ВВЭР в проектных авариях. Подольск, АО ОКБ «Гидропресс», 2014, 10 с.
3. Спассков В.П., Семишкин В.П., Шулимов В.Н., Дреганов О.И., Киселева И.В., Горячев А.В. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР. Москва, ИКЦ «Академкнига», 2004, 340 с. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_RU\\_NLR\\_bibl\\_604047/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_604047/) (дата обращения 15.04.2026).
4. Алексеев А.В., Киселева И.В., Дреганов О.И., Шулимов В.Н., Ижutow А.Л., Мохов В.А. Методика и результаты испытания в канале реактора МИР фрагмента ТВС ВВЭР-1000 в режиме максимальной проектной аварии *Атомная энергия*. 2007;103(5):286–291. URL: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t103-5\\_2007/p286/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t103-5_2007/p286/) (дата обращения 15.04.2026).
5. Киселева И.В. Исследование в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 в условиях, моделирующих II и III стадии аварии «большая течь»: дисс. канд. техн. наук. Димитровград, 2010, 132 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-v-reaktore-mir-povedeniya-tvelov-vver-1000-v-usloviyakh-modeliruyushchikh-ii-i-> (дата обращения 15.04.2026).
6. Дреганов О.И., Шулимов В.Н., Киселева И.В., Алексеев А.В. Измерение температуры оболочки твэла с выгоревшим топливом в диапазоне 500 – 900°C в реакторном эксперименте. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;4:50–60. DOI: <https://doi.org/10.26583/nre.2017.4.05>
7. Фомин Д.В., Малков А.П., Шараев А.М., Зайченко П.А. Особенности формирования загрузки активной зоны исследовательского реактора МИР.М1 при подготовке к проведению экспериментов типа LOCA. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»*. 2020;9(2):100–109. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20020030>

8. Shulimov V.N., Dreganov O.I., Izhutov A.L., Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Makhin V.M. LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor. In Proc. of the TopFuel Conference. Zurich, Switzerland, 13–17 September 2015. Brussels, European Nuclear Society, 2015, part II, p. 391 – 400.

9. Дреганов О.И. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 с повышенной ураноемкостью в аварии с потерей теплоносителя при моделировании условий в реакторе МИР: дисс. канд. техн. наук. Димитровград, 2017, 105 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/izuchenie-povedeniya-tvelov-vver-1000-s-povyshennoi-uranoemkostyu-v-avarii-s-poterei-teplono> (дата обращения 15.04.2026).

10. Алексеев А.В., Горячев А.В., Ижutow А.Л., Дреганов О.И., Киреева Л.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н. Результаты испытаний в реакторе МИР твэлов ВВЭР-1000 с высоким выгоранием топлива в условиях аварии с потерей теплоносителя. *Атомная энергия*. 2017;123(3):133–137. URL: [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t123-3\\_2017/p133/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t123-3_2017/p133/) (дата обращения 15.04.2026).

11. Алексеев А.В., Горячев А.В., Дреганов О.И., Ижutow А.Л., Шулимов В.Н., Спассков В.П. Изучение поведения твэлов ВВЭР-1000 в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA). Реакторные эксперименты МИР-LOCA/45 и МИР-LOCA/69. Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «МАЯТ-2017», 28–29 ноября 2017 г., Москва, с. 21–22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29438613> (дата обращения 15.04.2026).

12. Дреганов О.И., Шулимов В.Н., Макин Р.С., Алексеев А.В., Ижutow А.Л., Киселева И.В. Результаты расчетного анализа термомеханического состояния твэла ВВЭР-1000 после испытания в канале исследовательского реактора в условиях аварии с потерей теплоносителя (LOCA). *ВАНТ. Физика ядерных реакторов*. 2017;2:60–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29930419> (дата обращения 15.04.2026).

13. Алексеев А.В., Дреганов О.И., Иванов Н.А., Киселева И.В., Шулимов В.Н., Горячев А.В. Изучение поведения твэга с высоким выгоранием топлива в петлевом канале реактора МИР в условиях аварии с потерей теплоносителя. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» за 2022 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2023, с. 15–16. URL: [https://niiar.ru/sites/default/files/01\\_ngo-22\\_03-10-23\\_sayt.pdf](https://niiar.ru/sites/default/files/01_ngo-22_03-10-23_sayt.pdf) (дата обращения 15.04.2026).

14. Дреганов О.И., Алексеев А.В., Киселева И.В., Шулимов В.Н., Ижutow А.Л., Фомин Д.В. Испытания ATF-твэлов в канале реактора МИР в условиях проектных аварий. Научный годовой отчет АО «ГНЦ НИИАР» за 2022 г. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 2023, с. 14. URL: [https://niiar.ru/sites/default/files/01\\_ngo-22\\_03-10-23\\_sayt.pdf](https://niiar.ru/sites/default/files/01_ngo-22_03-10-23_sayt.pdf) (дата обращения 15.04.2026).

Поступила в редакцию 01.10.2025

После доработки 20.04.2026

Принята к опубликованию 12.05.2026

## Авторы

Ижutow Алексей Леонидович, заместитель директора – научный руководитель, к.т.н.,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Дреганов Олег Игоревич, начальник лаборатории, к.т.н.,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Киселева Ирина Владимировна, ведущий научный сотрудник, к.т.н.,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Алексеев Александр Вениаминович, старший научный сотрудник, к.т.н.,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Котов Николай Петрович, ведущий инженер,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Сутягина Яна Александровна, младший научный сотрудник,

E-mail: bri@niiar.ru

Полетаев Егор Иванович, младший научный сотрудник,

E-mail: bri@niiar.ru

Маркелов Александр Николаевич, научный сотрудник,

E-mail: bri@niiar.ru

UDC 621.039.548

## Reactor Testing of Experimental Fuel Rods under Design-Basis Loss-Of-Coolant Accident (LOCA) Conditions in the MIR.M1 Reactor Channel

**Izhutov A.L., Dreganov O.I., Kiseleva I.V., Alekseev A.V., Kotov N.P., Sutyagina Ya.A., Poletaev E.I., Markelov A.N.**

RIAR JSC,

*9 Zapadnoye Sh., 433510 Dimitrovgrad, Ulyanovsk reg., Russia*

### Abstract

The relevance of this study is associated with the necessity to substantiate the safety of reactor facility operation under maximum design-basis loss-of-coolant accidents (LOCA), which represents a key requirement of federal rules and regulations in the field of nuclear energy use. The paper presents a methodology for conducting reactor tests of experimental fuel rods under LOCA conditions in the MIR.M1 research reactor. An experimental procedure and a temperature scenario have been developed to ensure simulation of the second stage of a LOCA, including core dryout and fuel rod depressurization, as well as the third stage corresponding to thermal shock caused by cold water injection. The paper describes design solutions of the irradiation device and a refabricated fuel rod equipped with a differential transformer pressure sensor, which enables real-time monitoring of the internal gas pressure in the fuel rod and the cladding temperature during the experiment. Since 2014, a series of experiments has been carried out on fuel rods with different design features, burnup levels, and fuel compositions. The processes of fuel rod depressurization, cladding ballooning, fuel fragmentation, and fuel relocation have been investigated. The developed methodology ensures safe performance of experiments and prevents contamination of the primary coolant circuit. The obtained experimental data are used to evaluate the thermomechanical state of fuel rods, substantiate the safety of reactor facilities, verify computational codes, and expand the experimental database. The methodology provides reproducible LOCA conditions for single fuel rods and reduces labor intensity during preparation and execution of reactor tests, enabling integrated investigation of fuel rod behavior under design-basis loss-of-coolant accident conditions.

**Keywords:** LOCA, MIR.M1 research reactor, fuel rod, fuel rod depressurization, cladding ballooning, fuel fragmentation, fuel relocation, thermal shock, cladding temperature, gas pressure, irradiation device, reactor core

**For citation:** Izhutov A.L., Dreganov O.I., Kiseleva I.V., Alekseev A.V., Kotov N.P., Sutyagina Ya.A., Poletaev E.I., Markelov A.N. Reactor Testing of Experimental Fuel Rods under Design-Basis Loss-Of-Coolant Accident (LOCA) Conditions in the MIR.M1 Reactor Channel. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2026;2:174–189. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2026.2.11> (in Russian).

## References

1. Spasskov V.P., Shumskii A.M., Semishkin V.P., Shulimov V.N., Dreganov O.I., Kiseleva I.V. Reactor studies of emergency behavior of the VVER core at the PVP-2 loop facility of the MIR.M1 reactor. In proc. of the International Conference "Thermophysical Aspects of VVER Safety. Thermophysics-98". Obninsk, SSC RF – IPPE, 1998, vol. 2, pp. 42 – 51 (in Russian).
2. Mokhov V.A., Makhin V.M., Semishkin V.P. Acceptance criteria for VVER fuel rod depressurization in design-basis accidents. Podolsk, JSC OKB "Gidropress", 2014, 10 p. (in Russian).
3. Spasskov V.P., Semishkin V.P., Shulimov V.N., Dreganov O.I., Kiseleva I.V., Goryachev A.V. Computational justification of thermal-hydraulic characteristics of the reactor and VVER reactor plant. Moscow, Akademkniga Publ., 2004, 340 p. Available at: [https://rusneb.ru/catalog/000200\\_000018\\_RU\\_NLR\\_bibl\\_604047/](https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_bibl_604047/) (in Russian).
4. Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Dreganov O.I., Shulimov V.N., Izhutov A.L., Mokhov V.A. Testing procedure and results of tests performed on a VVER-1000 fuel assembly fragment in a MIR channel for a maximum anticipated accident. *Atomic Energy*, 2007;103(5):851–857. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-007-0135-7>
5. Kiseleva I.V. Investigation of VVER-1000 fuel rods in the MIR reactor under conditions simulating stages II and III of a large-break accident. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Dimitrovgrad, 2010, 132 p. URL: <https://www.dissercat.com/content/issledovanie-v-reaktore-mir-povedeniya-tvelov-vver-1000-v-usloviyakh-modeliruyushchikh-ii-i-> (accessed Apr.15, 2026) (in Russian).
6. Dreganov O.I., Shulimov V.N., Kiseleva I.V., Alekseev A.V. Measurement of the spent fuel rod cladding temperature during the in pile testing at 500 – 900°C. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017;4:50–60. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2017.4.05> (in Russian).
7. Fomin D.V., Malkov A.P., Sharaev A.M., Zaichenko P.A. Some features of the core loading formation for the MIR.M1 research reactor to prepare LOCA experiments. *Vestnik Natsional'nogo Issledovatel'skogo Yadernogo Universiteta «MIFI»*. 2020;9(2):100–109. DOI: <https://doi.org/10.1134/S2304487X20020030> (in Russian).
8. Shulimov V.N., Dreganov O.I., Izhutov A.L., Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Makhin V.M. LOCA test with high burnup VVER fuel in MIR reactor. In Proc. of the TopFuel Conference. Zurich, Switzerland, 13–17 September 2015. Brussels, European Nuclear Society, 2015, part II, pp. 391 – 400.
9. Dreganov O.I. Study of the behavior of VVER-1000 fuel rods with increased uranium capacity in a loss-of-coolant accident under simulation conditions in the MIR reactor. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Dimitrovgrad, 2017, 105 p. Available at <https://www.dissercat.com/content/izuchenie-povedeniya-tvelov-vver-1000-s-povyshennoi-uranoemkostyu-v-avarii-s-poterei-teplono> (accessed Apr.15, 2026) (n Russian).
10. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Izhutov A.L., Dreganov O.I., Kireeva L.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N. Results of Tests of VVER-1000 Fuel Elements with High Fuel Burnup in the MIR Reactor for LOC Incident Conditions. *Atomic Energy*. 2018;123(3):159–166. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-018-0318-4>
11. Alekseev A.V., Goryachev A.V., Dreganov O.I., Izhutov A.L., Shulimov V.N., Spasskov V.P. Study of VVER-1000 fuel rod behavior under loss-of-coolant accident conditions (LOCA). Reactor experiments MIR-LOCA/45 and MIR-LOCA/69. In Proc. of the All-Russian Scientific and Technical Conference "MAYAT-2017". Moscow, Nov. 28 – 29, 2017, p. 21 – 22. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29438613> (accessed Apr.15, 2026) (in Russian).
12. Dreganov O.I., Shulimov V.N., Makin R.S., Alekseev A.V., Izhutov A.L., Kiseleva I.V. Results of computational analysis of the thermomechanical state of a VVER-1000 fuel rod after testing in a research reactor channel under loss-of-coolant accident (LOCA) conditions. *VANT. Physics of Nuclear Reactors*. 2017;2:60–66. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=29930419> (accessed Apr. 15, 2026) (in Russian).

13. Alekseev A.V., Dreganov O.I., Ivanov N.A., Kiseleva I.V., Shulimov V.N., Goryachev A.V. Study of high burnup fuel rod behavior in the loop channel of the MIR reactor under loss-of-coolant accident conditions. Scientific Annual Report of RIAR JSC for 2022. Dimitrovgrad, RIAR JSC Publ., 2023, pp. 15 – 16. URL: [https://niiar.ru/sites/default/files/01\\_ngo-22\\_03-10-23\\_sayt.pdf](https://niiar.ru/sites/default/files/01_ngo-22_03-10-23_sayt.pdf) (accessed Apr.15, 2026) (in Russian).

14. Dreganov O.I., Alekseev A.V., Kiseleva I.V., Shulimov V.N., Izhutov A.L., Fomin D.V. Testing of ATF fuel rods in the MIR reactor channel under design-basis accident conditions. Scientific Annual Report of RIAR JSC for 2022. Dimitrovgrad, RIAR JSC Publ., 2023, p. 14. URL: [https://niiar.ru/sites/default/files/01\\_ngo-22\\_03-10-23\\_sayt.pdf](https://niiar.ru/sites/default/files/01_ngo-22_03-10-23_sayt.pdf) (accessed Apr.15, 2026) (in Russian).

## Authors

Alexey L. Izhutov, Deputy Director, Science & Research, Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Oleg I. Dreganov, Head of the laboratory, Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Irina V. Kiseleva, Leading researcher, Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Alexander V. Alekseev, Senior researcher, Cand. Sci. (Engineering),  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Nikolai P. Kotov, Leading engineer,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Yana A. Sutyagina, Junior researcher,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Egor I. Poletaev, Junior researcher,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)

Alexander N. Markelov, Researcher,  
E-mail: [bri@niiar.ru](mailto:bri@niiar.ru)