



УДК 620.3:621, 621.039.542.342, 621.039.542.33, 629.039.58

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.22](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.22)

АНАЛИЗ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА ТИПА БН-1200 С РАЗНЫМИ ВИДАМИ МОХ-ТОПЛИВА

В.С. Окунев*

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Россия, 105005, Москва, 2-я
Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

*e-mail: okunevvs@bmstu.ru

Аннотация. В статье рассмотрены разные виды смешанного уран-плутониевого оксидного топлива для быстрых реакторов нового поколения. Представлены результаты математического моделирования аварийных режимов, сопровождающихся отказом аварийной защиты, в реакторе типа БН-1200. Использование нанотехнологий при изготовлении ядерного топлива позволит не только повысить мощность реактора за счет снижения пористости топлива, но и существенно повысить безопасность реактора. Результаты исследования показали, что при использовании традиционного смешанного оксидного топлива отдельные аварийные режимы завершаются безаварийно, но при наложении режимов возможны аварии. При использовании топлива, созданного с использованием нанотехнологий, реактор безопасен. Перспективно топливо на основе смеси микрозерен оксида с добавками нанопорошка оксида. Еще более привлекательно оксидное топливо с добавками нанопорошка металлического урана.

Ключевые слова: ядерный реактор, безопасность, аварийный режим, смешанное оксидное топливо, натриевый теплоноситель, нанотехнологий, нанопорошок.

UDC 620.3:621, 621.039.542.342, 621.039.542.33, 629.039.58

SAFETY ANALYSIS OF THE BN-1200 REACTOR WITH DIFFERENT TYPES OF MOX FUEL

V.S. Okunev*

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow, 105005, 2-ya Baumanskaya ul.,
5/1,

*e-mail: okunevvs@bmstu.ru

Abstract. This article examines various types of mixed uranium-plutonium oxide fuel for next-generation fast reactors. The results of mathematical modeling of emergency modes involving failure of the emergency protection system in a BN-1200 reactor are presented. The use of nanotechnology in nuclear fuel fabrication will not only increase reactor power by reducing fuel porosity but also significantly improve reactor safety. The study showed that when using traditional mixed oxide fuel, individual emergency modes resolve safely, but when multiple modes overlap, accidents are possible. The reactor is safe when using fuel created using nanotechnology. Fuel based on a mixture of oxide micrograins with oxide nanopowder additives holds promise. Oxide fuel with uranium metal nanopowder additives is even more attractive.

Key words: nuclear reactor, safety, emergency mode, mixed oxide fuel, sodium coolant, nanotechnology, nanopowder.

Введение

В соответствии с Генеральной схемой размещения объектов электроэнергетики до 2042 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации 30 декабря 2024 г., в России на Белоярской АЭС планируется сооружение пятого энергоблока с инновационным быстрым реактором 4-го поколения БН-1200М. Ввод в эксплуатацию намечен на 2034 год. Реактор будет работать в замкнутом ядерном топливном цикле. Переход



к замкнутому топливному циклу делает ядерную энергетику практически неограниченным источником энергии на ближайшую перспективу.

Использование инновационных материалов позволит существенно улучшить некоторые характеристики реакторов, включая безопасность. Для реакторов типа БН автором рассматривается традиционное и инновационное смешанное уран-плутониевого оксидное топливо (МОХ-топливо), созданное на основе нанотехнологий. Среди новшеств — МОХ-топливо с небольшими добавками нанопорошка МОХ, а также МОХ-топливо с добавками нанопорошка металлического урана (20 % по объему). Проводится сравнительный анализ самозащищенности реакторов типа БН-1200 с традиционным и новым топливом.

В качестве материала оболочек твэлов рассматривается сталь ЭП450 дисперсно-упрочненная наноксидом Y_2O_3 .

Методы и материалы

Реактор БН-1200М. Пассивная безопасность. Инновационный реактор БН-1200М заметно отличается от своего предшественника БН-800. Тепловая мощность реактора 2800 МВт, электрическая (брутто) — 1220 МВт. Реактор ориентирован на использование МОХ (mixed oxide, оптимальный вариант — $UO_{1,8}-Pu_4O_7$) или, в перспективе, MN-топлива (mixed nitride, UN-PuN).

Кроме активной аварийной защиты предусмотрена пассивная защита в виде гидравлически взвешенных стержней и на основе температурного принципа действия. Система аварийного отвода тепла предусматривает наличие воздушных теплообменников, присоединенных к первому контуру. Есть система удержания расплавленного топлива и система локализации аварийных выбросов [1].

Предусмотрено наличие трех типов стержней защиты, основанных на пассивных принципах [1]:

- на электромагнитных захватах (поглощающие нейтроны стержни падают при отключении электроэнергии);
- поглощающие стержни-поплавки, плавающие в теплоносителе (опускаются в активную зону при прекращении циркуляции теплоносителя);
- поглощающие стержни, подвешенные на вставках легкоплавкого металла; при повышении температуры выше допустимого значения, они плавятся, а стержни опускаются в активную зону.

Вероятность тяжелого повреждения активной зоны при авариях оценивается частотой событий около 5×10^{-7} на реактор в год (для БН-600 — 10^{-5} , для БН-800 — $1,2 \cdot 10^{-6}$) [1].

По оценкам специалистов предприятия главного конструктора реакторной установки АО «ОКБМ Африкантов» использование пассивных систем безопасности и свойств внутренней самозащищенности исключает необходимость эвакуации населения при любых технически возможных авариях. Техно-экономические показатели промышленного реактора БН-1200 для серийного сооружения сопоставимы с показателями реакторов ВВЭР нового поколения [1].

Материалы. В составе топлива предполагается использовать обедненный уран (80 %) и плутоний (80 %), извлеченный из отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000 и очищенный от изотопа ^{238}Pu . Изотопный состав урана (%): 0,4 ^{235}U ; 99,6 ^{238}U . Изотопный состав плутония (%): 60,0 ^{239}Pu ; 25,0 ^{240}Pu ; 10,9 ^{241}Pu ; 4,1 ^{242}Pu . Температура плавления МОХ-топлива около 3023 К.

Как отмечалось, в качестве материала оболочек твэлов рассматривается сталь ЭП450 дисперсно-упрочненная наноксидом Y_2O_3 . Средний размер частиц оксида иттрия — 10...20 нм.

Варианты топливной загрузки. Рассмотрены три варианта топливной загрузки реактора типа БН-1200. Первый вариант предполагает использование классического МОХ-топлива ($UO_{1,8} - Pu_4O_7$), второй — МОХ-топлива с небольшими добавками нанопорошка



МОХ, третий — МОХ-топлива с добавками нанопорошка металлического урана (20 % по объему).

Топливо второго варианта аналогично модифицированному диоксиду урана с аномально высокой теплопроводностью предложенному учеными АО «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского», НИЦ «Курчатовский институт» и ОАО «ГНЦ НИИАР» [2].

Топливо третьего варианта аналогично топливу на основе мелкодисперсного диоксида урана и нанопорошка урана, предложенному авторами патента RU2459289C1 [3]. При использовании такого топлива достижимо условие КВА (коэффициент воспроизводства в активной зоне) = 1, что способствует исключению потенциально опасных аварий с разгоном на мгновенных нейтронах.

Методы. В основу исследований положены методы математического моделирования. Исследования проведены с помощью авторских кодов FRISS, Dragon-M [4], известных кодов WIMS [5] и MCU [6].

Код FRISS позволяет моделировать аварийные режимы работы быстрых реакторов. Код Dragon-M используется для расчетных и оптимизационных исследований активной зоны. Код MCU предназначен для проведения прецизионных нейтронно-физических расчетов. Он реализует решение газокинетического уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло. Код WIMS предназначен для расчета бесконечных решеток твэлов ядерных реакторов. Код WIMS использован для уточнения расчета некоторых коэффициентов и эффектов реактивности. Код Dragon-M использует диффузионное приближение для нейтронно-физических расчетов активной зоны. Такое приближение дает большую погрешность в оценке пустотного эффекта реактивности для неоднородной по составу активной зоны. Поэтому потребовалось уточнение результатов по коду MCU.

Результаты

ATWS. Рассматривались следующие аварийные режимы и их комбинации (аббревиатуры общеприняты) из числа ATWS (anticipated transients without scram):

- TOP WS (Transient Overpower Without Scram); режим инициирован вводом положительной реактивности;
- LOF WS (Loss of Flow Without Scram); режим инициирован обесточиванием всех главных циркуляционных насосов;
- OVC WS (Overcooling Accident Without Scram); режим инициирован переохлаждением теплоносителя в результате перевода насосов на повышенную производительность или подключением «холодной» резервной петли;
- LOHS WS (Loss of Heat Sink Without Scram); режим инициирован прекращением теплопередачи ко второму контуру.

Отдельно рассматривался аварийный режим LOCA WS (Loss of Coolant Accident Without Scram).

Активная зона. Компонировка активной зоны реактора типа БН-1200 получена автором с помощью кода Dragon-M и может отличаться от проекта БН-1200М. За основу принята компоновка, твэлы и решетка твэлов реактора БН-800 [7].

Реактор имеет три радиальные зоны профилирования. Зоны различаются концентрацией делящихся нуклидов, отношением $Pu/(Pu+U)$ в свежем топливе. В центральной зоне (зоне малого обогащения) отношение $Pu/(Pu+U)$ равно 20,08 %; в зоне среднего обогащения — 23,17 %; в зоне большого обогащения — 27,35 %.

Для получения консервативной оценки безопасности предположим отсутствие пассивных систем и несрабатывание активных.

Исходные события. Предполагается, что режим TOP WS инициирован вводом реактивности. Рассматривается ввод реактивности $0,99 \beta$ (β — эффективная доля запаздывающих нейтронов) за 10 с по линейному закону от времени. Режим LOF WS происходит при полном обесточивании главных циркуляционных насосов. Расход снижается по гиперболическому закону от времени до установления режима естественной циркуляции теплоносителя. Режим LOHS WS инициирован гипотетическим событием: поступлением на



вход в активную зону натрия, нагретого до температуры выхода за время 10 с. При анализе режима OVC WS также постулируется гипотетическое событие: увеличение производительности главных циркуляционных насосов в полтора раза за 10 с.

Классическое МОХ-топливо. На рис. 1 представлены результаты математического моделирования аварийных режимов ATWS в реакторе типа БН-1200 с традиционным МОХ-топливом. Цифрами у кривых обозначены аварийные режимы: 1 — TOP WS, 2 — LOF WS, 3 — LOHS WS, 4 — OVC WS.

С точки зрения достижения максимальной температуры топлива наиболее опасен режим TOP WS, теплоносителя — LOF WS.

В аварийном режиме TOP WS мощность и максимальная температура топлива увеличивается со временем (см. рис. 1, кривая 1). Для их ограничения необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности.

В реакторах с оксидным топливом в режиме LOF WS максимальная температура топлива уменьшается со временем (см. рис. 1, кривая 2). При обесточивании главных циркуляционных насосов расход теплоносителя через активную зону снижается. Однако мощность уменьшается быстрее, чем тепловой поток от топлива к теплоносителю. В результате от топлива отводится больше теплоты, чем генерируется в нем [8]. В итоге температура топлива уменьшается со временем. Итак, максимальная температура топлива и мощность уменьшаются со временем. Большой по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности ведет к меньшему снижению этих параметров. В результате максимальная температура теплоносителя может увеличиться до недопустимых значений. В этом случае роль отрицательного доплеровского коэффициента реактивности в обеспечении самозащитенности в режиме LOF WS негативна. Для повышения самозащитенности реактора необходимо уменьшать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности.

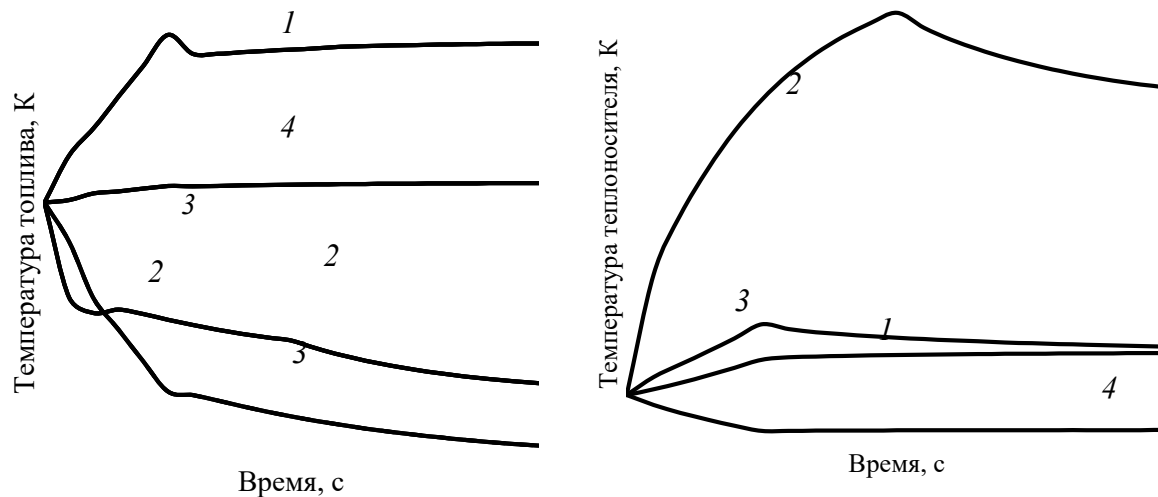


Рис. 1. Временная зависимость максимальных температур топлива и теплоносителя в аварийных режимах ATWS в реакторе типа БН-1200 с традиционным МОХ-топливом.

Fig. 1. Time dependence of maximum temperatures of fuel and coolant in emergency ATWS modes in a BN-1200 reactor with traditional MOX fuel.

Во всех аварийных режимах ATWS сохраняются температурные запасы до плавления топлива (около 195 К в режиме TOP WS), кипения теплоносителя (33 К в режиме LOF WS), разрушения оболочек твэлов. При наложении режимов LOF WS и TOP WS (ввод реактивности $0,99 \beta$ за 10 с) теплоноситель кипит. При вводе реактивности $0,3 \beta$ за 10 с удастся избежать кипения, точнее, температура натрия превышает точку кипения на 4 К в течение 1 с.



Существенным недостатком диоксидного топлива (даже гипостехиометрического состава) является противоположная роль доплеровского коэффициента реактивности в аварийных режимах, инициированных уменьшением расхода теплоносителя и вводом положительной реактивности. Повышение самозащищенности от одной из этих аварий ведет к снижению самозащищенности от другой аварии.

Модифицированное МОХ-топливо с добавками нанопорошка МОХ. При переходе к использованию такого топлива максимальные температуры в реакторе, в том числе в режимах ATWS, заметно снижаются (см. рис. 2, обозначения прежние) по сравнению с реактором с МОХ-топливом.

Как и в предыдущем варианте с точки зрения достижения максимальной температуры топлива наиболее опасен режим TOP WS, теплоносителя — LOF WS.

Главное, что в режиме LOF WS максимальная температура топлива немного увеличивается с 1376 до 1393 К (к моменту времени, равному времени выбега насосов, т. е. 20 с), затем уменьшается со временем до 1113 К (см. рис. 2, кривая 2). Для ограничения температуры топлива в максимуме (соответствующем 20 с) необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности. Именно этот максимум температуры топлива определяет максимальную температуру теплоносителя (1023 К). Максимальная температура теплоносителя в установившемся режиме естественной циркуляции относительно невелика (876 К), запас до кипения 280 К.

Для безопасного завершения режима TOP WS также необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности, т. е. роль доплеровского коэффициента реактивности одинакова.

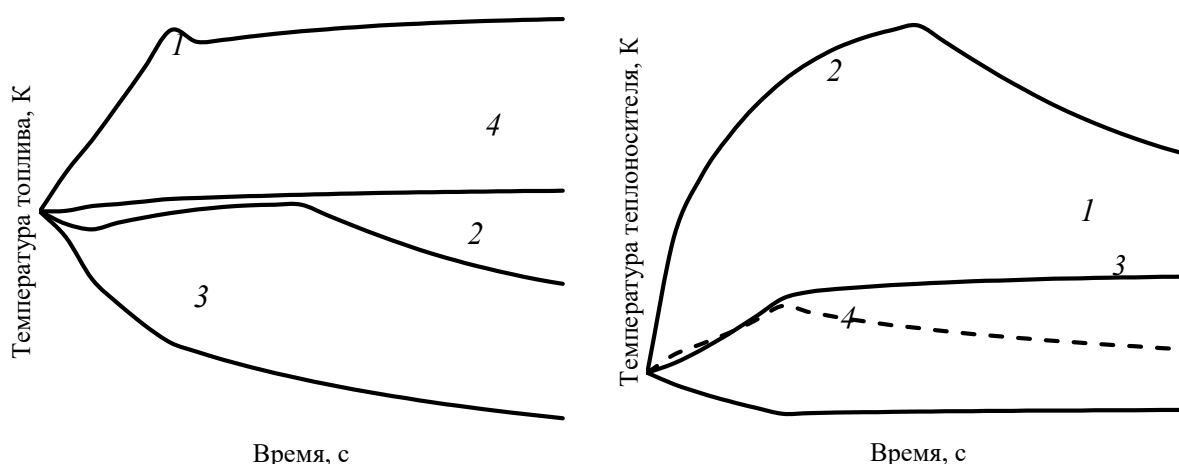


Рис. 2. Временная зависимость максимальных температур топлива и теплоносителя в аварийных режимах ATWS в реакторе типа БН-1200 с модифицированным МОХ-топливом с небольшими добавками нанопорошка МОХ.

Fig. 2. Time dependence of maximum temperatures of fuel and coolant in emergency ATWS modes in a BN-1200 reactor with modified MOX fuel with small additions of MOX nanopowder.

Наложение режимов LOF WS и TOP WS не опасно. При вводе реактивности 0,99 β за 10 с температура теплоносителя превышает точку кипения на 4 К в течение 1 с. При наложении режимов LOF WS, TOP WS и LOHS WS происходит нейтрализация процессов. Максимальная температура теплоносителя 1974 К (на 19-й с.), топлива 1391 К (на 14-й с.). В результате такое наложение менее опасно, чем наложение LOF WS и TOP WS.

МОХ-топливо с добавками нанопорошка металлического урана. На рис. 3 представлены результаты математического моделирования аварийных режимов ATWS в реакторе типа БН-1200 с металлокерамическим топливом на основе микрозерен МОХ и нанопорошка урана (20 % об.). Обозначения прежние.

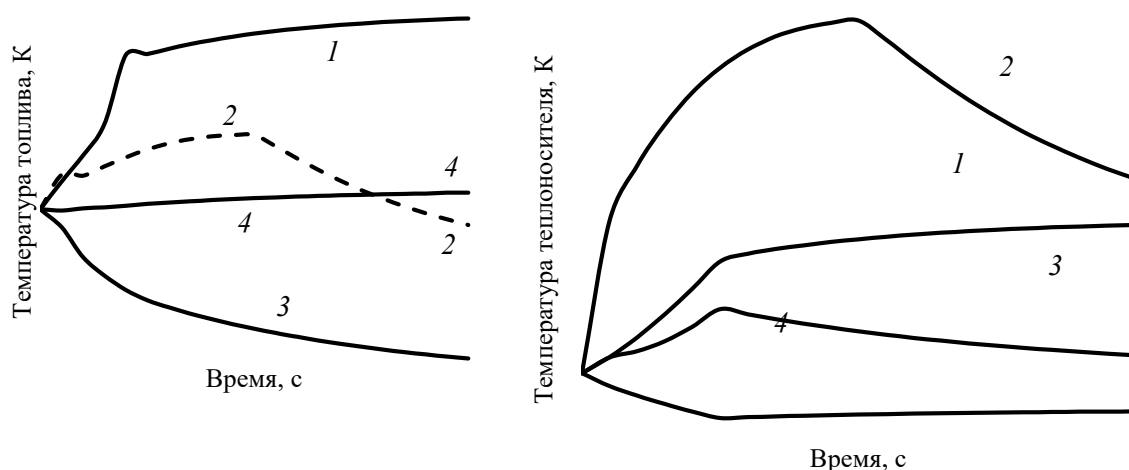


Рис. 3. Временная зависимость максимальных температур топлива и теплоносителя в аварийных режимах АТВС в реакторе типа БН-1200 с топливом на основе микрозерен MOX и нанопорошка урана.

Fig. 3. Time dependence of maximum temperatures of fuel and coolant in emergency ATWS modes in a BN-1200 reactor with fuel based on MOX micrograins and uranium nanopowder.

Как и в первых двух вариантах с точки зрения достижения максимальной температуры топлива наиболее опасен режим TOP WS, теплоносителя — LOF WS. Однако безопасны любые комбинации режимов АТВС. Из всех рассмотренных вариантов реакторов этот самый безопасный. При наложении режимов LOF WS и TOP WS максимальная температура топлива достигает 1558 К, теплоносителя — 1121 К (через 20 с после начала процесса). Это наиболее опасная комбинация аварийных режимов. При наложении режимов LOF WS, TOP WS и LOHS WS максимальная температура топлива достигает 1282 К (на 14-й с), теплоносителя — 1028 К (на 17-й с). Такое наложение менее опасно, чем наложение LOF WS и TOP WS. Мощность реактора в установившемся режиме OVC WS превышает номинальную на 20 %. В режимах TOP WS и OVC WS мощность и температура топлива максимальны в установившемся режиме. В режимах TOP WS температура теплоносителя максимальна в установившемся режиме.

Обсуждение

Быстрые реакторы средней и большой мощности с оксидным топливом характеризуются большим по абсолютному значению отрицательным доплеровским коэффициентом реактивности. Это связано с замедлением нейтронов на легких ядрах кислорода в составе топлива и смещением спектра реактора в область резонансов. Отрицательный доплеровский коэффициент реактивности препятствует отклонению температуры топлива и мощности реактора от номинальных значений. Он действует практически мгновенно. Если температура топлива и мощность увеличиваются в аварийном режиме, его роль в развитии аварийной ситуации благоприятна. Если температура топлива и мощность уменьшаются, то его роль негативна. Он препятствует уменьшению этих параметров. Высокая температура топлива и мощность в длительном по времени новом квазиустановившемся состоянии ведут к повышению температуры теплоносителя. Это наблюдается, например, в аварийном режиме LOF WS в быстром реакторе БН-1200 с традиционным MOX-топливом.

В реакторе типа БН-1200 с традиционным MOX-топливом в режиме LOF WS максимальная температура топлива уменьшается со временем (см. рис. 1, кривая 1). Большой по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности ведет к меньшему снижению максимальной температуры топлива и мощности реактора. В результате максимальная температура теплоносителя может увеличиться до недопустимых значений. (В рассмотренной компоновке запас до кипения составляет 33 К.) В этом случае роль отрицательного доплеровского коэффициента реактивности в обеспечении



самозащищенности в режиме LOF WS негативна. Для повышения самозащищенности реактора необходимо уменьшать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности.

В режиме TOP WS, наоборот, роль отрицательного доплеровского коэффициента реактивности позитивна. Для повышения самозащищенности необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности. Противоположная роль доплеровского коэффициента реактивности в разных аварийных режимах ухудшает предсказуемость развития этих аварийных ситуаций. При использовании МОХ-топлива с небольшими добавками нанопорошка МОХ, проблема в целом остается, но менее ярко выражена.

Переход на МОХ-топливо с добавками нанопорошка металлического урана в большей степени способствует решению проблемы. Температура топлива в режиме LOF WS повышается, достигает максимума в момент времени, равный времени выбега насосов, затем уменьшается до значения, меньшего номинального. В максимуме для повышения самозащищенности необходимо увеличивать по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности. То же следует делать для повышения самозащищенности от аварий TOP WS. Роль доплеровского коэффициента реактивности в обеспечении самозащищенности от этих двух аварий одинакова. Остальные режимы не представляют опасности.

Даже при использовании традиционного МОХ-топлива отдельные аварийные режимы из числа ATWS в реакторе БН-1200 завершаются безаварийно. При наложении режимов LOF WS и TOP WS натриевый теплоноситель кипит.

Реактор БН-1200 с инновационным МОХ-топливом безопасен. Комбинации любых аварийных режимов не приводят к аварии. Можно обойтись без пассивных систем защиты. Наибольшая безопасность достигается при использовании металлокерамического топлива на основе микрозерен МОХ и нанопорошка металлического урана.

Пустотный эффект реактивности при наиболее опасном сценарии его реализации (пузыри в центре активной зоны) положителен и в несколько раз превышает эффективную долю запаздывающих нейтронов. Для снижения пустотного эффекта реактивности можно разместить в тепловыделяющих сборках центральную часть активной зоны ТВЭЛы с ураном-238 в качестве дополнительного поглотителя нейтронов. Можно также использовать нанопорошок урана-238 в составе топлива. Эти меры увеличат по абсолютному значению отрицательный доплеровский коэффициент реактивности.

Заключение

Оксидное топливо быстрых реакторов (включая МОХ-топливо) имеет значительные резервы и потенциальные возможности в обеспечении безопасности. Эти резервы связаны с использованием нанотехнологий. Так, реактор БН-1200 с традиционным МОХ-топливом достаточно безопасен. Теплоноситель кипит только при наложении маловероятных аварийных режимов LOFWS и TOPWS. Использование МОХ-топлива с небольшими добавками нанопорошка МОХ заметно повышает безопасность реактора. Наибольших успехов в обеспечении внутренней самозащищенности следует ожидать при использовании МОХ-топлива с добавками нанопорошка металлического урана. При этом нет необходимости в пассивных системах обеспечения безопасности. Они носят только страховочный характер. Изменяя обогащение нанопорошка металлического урана, можно увеличивать мощность реактора (высокое обогащение) или минимизировать пустотный эффект реактивности (обедненный уран). Конечно, при использовании нанотехнологий стоимость реактора увеличивается. Это может быть оправдано только повышением мощности и, в гораздо большей степени, безопасности.

Интересная особенность реактора БН-1200 с инновационным МОХ-топливом состоит в том, что наложение аварийных режимов LOF WS, TOP WS и LOHS WS менее опасно, чем наложение LOF WS и TOP WS.



Окончательный выбор топлива и концепции реактора должен основываться на экономическом анализе. Изготовление нанопорошков ядерного топлива основано на измельчении более крупных фракций. Это намного дешевле, чем синтез наночастиц из молекул.

Литература

1. Васильев Б.А., Васяев А.В., Зверев Д.Л., Шепелев С.Ф., Аширметов М.Р., Ершов В.Н., ... Ошканов Н.Н. Инновационный проект энергоблока БН-1200 как основа эволюционного развития направления БН. *Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. докладов IV Международной научно-технической конференции*. М.: АО «НИКИЭТ», 2016. Т. 1. С. 30-40..
2. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н. “Исследование свойств модифицированного диоксида урана”. *Атомная энергия*. 2006. Вып. 101. № 5. С. 347–352.
3. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н., Рябый В.М., Захарова М.И., Гайдученко А.Б., ... Кузьмин С.В. “Исследование модифицированного топлива UO_2 с аномально повышенной теплопроводностью”. *Атомная энергия*. 2015. Том 119. № 3. С. 155–164.
4. Фёдоров Ю.С., Бураков Б.Е., Гарбузов В.М., Кицай А.А., Петрова М.А. Способ получения таблеток ядерного топлива на основе диоксида урана. Патент на изобретение № 2459289 (2012).
5. Okunev V.S. Designing of New Generation of the Nuclear Reactors. *AIP Conference Proceedings* 2195, 020012 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5140112>
6. Ganesan S. “Update of the WIMS-D4 nuclear data library”. Status Report of the IAEA WIMS Library Update Project, International Nuclear Data Committee, INDC(NDS)-290, International Atomic Energy Agency, Vienna, 1993. URL: <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0290.pdf>
7. Gurevich M.I., Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A. “Estimation of some neutron physics characteristics by Monte-Carlo method using the importance function”. *Annals of Nuclear Energy*, August 2019, Vol. 130, pp. 388–393.
8. IAEA-TECDOC-1139. Transient and accident analysis of a BN-800 type LMFR with near zero void effect. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. May 2000.
9. Хаммел Г., Окренг Д. Коэффициенты реактивности в больших энергетических реакторах на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1975. – 304 с.