

ОТ НОВЫХ ЛОКАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ К УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМ ЯДЕРНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ

Окунев В.С. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия)

Введение

После завершения концептуальных проработок ядерного реактора нового поколения задачи оптимального проектирования теряют актуальность. Им на смену приходят новые (в том числе оптимизационные) задачи или задачи локальной оптимизации. Как и при проектировании реактора, особую значимость приобретают задачи с ограничениями без критерия оптимальности. Решение таких задач позволяет выбрать новые материалы и, в конечном итоге, ведет к совершенствованию технологий, иногда к технологическим прорывам, причем в рамках существующих технологий, разработанных ранее.

Рассматриваются проекты реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым охлаждением. Такие установки характеризуются высокой степенью самозащитности. Технологически освоенные реакторы других типов не позволяют проиллюстрировать решение задачи, поскольку не обладают свойством внутренней самозащитности от всей совокупности аварий, не исключенных детерминистически.

1. Этапы решения оптимизационных задач при проектировании ЯЭУ

1.1. Первый этап

На первом этапе разработки реакторов нового поколения актуально решение непрерывных задач оптимального проектирования в той или иной постановке. В качестве управляющих параметров обычно выбирают геометрические характеристики активной зоны и решетки ТВЭЛов (ТВС), размеры зон, расход теплоносителя и другие. В числе ограничений задачи – ограничения для функционалов, характеризующих номинальные режимы работы реактора (функционалов надежности и экономической эффективности), аварийных режимов и их комбинации, не исключенные детерминистически (функционалов безопасности). В качестве критерия оптимальности принято рассматривать экономические характеристики АЭС, например, стоимость производимой электроэнергии. Однако область безопасных компоновок в пространстве управлений может оказаться столь малой, что выбор критерия (критериев) оптимальности не имеет принципиального значения. По этой причине предпочтительны задачи локальной оптимизации (или оптимизации по локальному критерию), где в качестве целевых можно рассматривать некоторые функционалы безопасности, не вошедшие в ограничения задачи, например, пустотный эффект реактивности (ПЭР), реализующийся при осушении (или уменьшении плотности теплоносителя всего реактора. В этом случае наиболее опасный, локальный ПЭР, реализующийся при осушении (или уменьшении плотности теплоносителя) центральной части активной зоны, целесообразно рассматривать в числе ограничений задачи.

Представляет интерес задачи поиска наиболее опасного сценария реализации ПЭР. Она включает две подзадачи. Первая связана с определением геометрической области (как правило, в центральной части активной зоны), при осушении которой ПЭР максимален. В число расширенного вектора управления вводят размеры области. Задачу решают итерационно. После решения задачи максимизации локального ПЭР, формулируют новую задачу минимизации этого ПЭР за счет изменения вектора управления (при постоянных размерах области осушения). Для новой полученной компоновки необходима коррекция результатов. С этой целью вновь решают первую

задачу определения наиболее опасной области осушения. Вторая подзадача связана с определением плотности теплоносителя (что в первом приближении соответствует не полному осушению, а вовлечению пузырей в активную зону), при которой ПЭР максимален. Повторяют решение первой задачи с учетом не полного осушения зоны и т. д.

На начальном этапе проектирования параметры компоновки точно не определены. Это ведет к необходимости учитывать неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций. Все аварийные ситуации объединяют в малое число групп. Критерий такого объединения – возмущение (изменение) какого-либо параметра, инициирующее аварийный режим. В быстрых реакторах с жидкометаллическим охлаждением это изменение температуры теплоносителя на входе в активную зону, расхода теплоносителя, реактивности. (В общем случае необходимо рассматривать и изменение давления в активной зоне.) Неопределенности в сценариях развития аварийных ситуаций легко свести к неопределенностям в возмущениях (амплитудным значениям возмущения, законов внесения возмущений со временем).

В первую очередь рассматривают события, сопровождающиеся несрабатыванием аварийной защиты (режимы ATWS). С целью минимизации размерности задачи оптимального проектирования предварительно решают задачу ранжирования аварийных ситуаций по степени опасности и выбора наиболее опасной комбинации режимов из числа ATWS. Автором эта задача решена с помощью максиминной стратегии кооперативной игры. В качестве объектов задачи рассматриваются аварийные ситуации и их комбинации. В качестве критериев рассматриваются функционалы безопасности, прогнозируемая частота и риск той или иной аварийной ситуации. Подход представляет собой симбиоз всех известных методов анализа безопасности (детерминистического, феноменологического, вероятностного).

На основе поиска критериев разложимости исходной задачи на подзадачи, поиска и анализа дополнительной информации (изменение со временем основных функционалов безопасности в аварийных режимах, анализ усугубления и нейтрализации аварийных режимов при их наложении) исходную задачу с неопределенными данными, характеризующими сценарии развития аварийных ситуаций, к небольшому числу детерминированных задач. (В наиболее простых случаях – к двум детерминистским аналогам.) Эффективная процедура сведения исходной задачи с неопределенными данными к малому числу детерминистских аналогов предложена и реализована автором ранее [1, 2].

После получения окончательного решения в виде характеристик оптимальной или предпочтительной компоновки необходимо уточнение результатов. Это связано и с использованием приближенных математических моделей в оптимизации, и с непрерывностью решаемых задач. Уточнение возможно на основе использования программных комплексов прецизионных расчетов с учетом частичной целочисленности (дискретности) задачи оптимального проектирования. Для проведения вычислительного эксперимента или реализации так называемых экспериментальных методов оптимизации [3] (по существу, вариантных расчетов) на базе прецизионных кодов строят иерархические структуры с регулируемой точностью.

Итак, на первом этапе разработки реакторов нового поколения определена оптимальная или предпочтительная компоновка.

В идеальном случае желательно получить область (множество) условно равнобезопасных компоновок в пространстве управлений. (Такие области – результат решения задачи с ограничениями без критерия оптимальности.) Это Парето-оптимальные объекты. Принято считать, что человек в словесных оценках хорошо различает не более трех–шести градаций [4], по данным 1960-х гг. [5] – не более пяти–

семи градаций. (По этой причине пятибалльную, точнее четырехбалльную, систему оценки знаний школьников и студентов, принятую в нашей стране, можно считать идеальной.) Значит, лицу, принимающему окончательное решение о выборе проекта для дальнейшей практической реализации (строительства), желательно предложить не более трех вариантов.

1.2. Второй этап

Второй этап предполагает наличие известных (принятых в концептуальном проекте) параметров компоновки реактора. Эти параметры принимают за основу при проектировании реактора. Обычно они уже не требуют радикального изменения, но их можно корректировать. Иначе говоря, в решении задачи оптимального проектирования уже нет необходимости, оптимизация геометрии активной зоны не нужна, нужны новые материалы, и, как следствие, новые технологии, привязанные к полученным на первом этапе оптимальным проектным решениям.

Формулируют новые задачи оптимизации (относящиеся к локальным задачам), где в качестве управляющих параметров рассматривают физические, химические, прочностные свойства материалов активной зоны: топлива, теплоносителя, конструкционных материалов, их стоимостные характеристики, технологическую освоенность и совместимость. Актуально решения таких задач без критерия оптимальности на поиск области (множества) допустимых материалов активной зоны (и не только активной зоны).

Решение таких задач часто абстрактно: не соответствует реальным материалам. После определения области допустимых материалов требует поиска реальных материалов (если они существуют) с заданными свойствами.

Например, при выборе оптимального топлива в числе управлений задачи рассматривают плотность, теплоемкость и теплопроводность топлива, в числе ограничений задачи температуру плавления или начала разложения топлива. Максимально допустимое значение температуры может изменяться в процессе решения задачи. Если оно уменьшается, необходимы дополнительные (в том числе технологические) ограничения, препятствующие этому. В ряде случаев (в наиболее удачных случаях) при качественном изменении состава топлива максимально допустимую температуру удастся сохранить постоянной.

Задачу выбора предпочтительного теплоносителя и ранжирования жидкометаллических теплоносителей по степени предпочтительности решают в два этапа. Решение предполагает не простое сравнение свойств отдельных теплоносителей или пар «теплоноситель – конструкционный материал», а сравнение оптимальных компоновок активных зон, охлаждаемые разными теплоносителями, в том числе экзотическими для ядерной техники. Оптимальные компоновки получены при одинаковой постановке задач с учетом особенностей каждого конкретного теплоносителя. Лексикографический метод решения таких задач выбран в качестве наиболее эффективного. В качестве предпочтительного теплоносителя для энергетических быстрых реакторов большой мощности выбран жидкий свинец. Это первый этап.

На втором этапе корректируют состав теплоносителя. Используют расширенный вектор управления. В состав управляющих параметров включают сечения неупругих процессов для материала теплоносителя (что позволяет рассматривать свинец с малыми добавками других металлов) или изотопный состав свинца, плотность теплоносителя и другие. Прочие управления задачи оптимального проектирования переводят в разряд исходных данных, не изменяемых в процессе оптимизации. В числе ограничений задачи

– температуры кипения и замерзания теплоносителя, температура разрушения (разгерметизации) оболочек ТВЭЛОВ.

Выбор предпочтительных конструкционных материалов предполагает включение в состав управляющих параметров плотности, теплопроводности, теплоемкости конструкционных материалов, сечения поглощения нейтронов. В числе ограничений задачи рассматривают максимальные температуры, прочность и другие. Сечение поглощения нейтронов конструкционными материалами оказывает существенное влияние на ПЭР, включая локальный, реализующийся при осушении (уменьшении плотности теплоносителя) центральной части активной зоны, и критичность реактора (моделируется ограничением $k_{эфф} = 1$).

2. Практическая реализация задач второго этапа

2.1. Программное обеспечение

В качестве программного обеспечения используются разные версии программного комплекса оптимизации компоновок быстрых реакторов («ДРАКОН-М» [6]), усовершенствованные и адаптированные автором к решению новых оптимизационных задач, программа «FRISS» моделирования аварийных режимов, включая ситуации, сопровождающиеся отказом аварийной защиты [6]. В вектор управления оптимизационного комплекса включены свойства материалов активной зоны (топлива, теплоносителя, конструкционных материалов): плотность, теплопроводность, теплоемкость, пористость, вязкость. Для нейтронно-физических расчетов также используются известные коды «MCNP» [7] и «WIMS» [8] с современным константным обеспечением. Также используется ряд вспомогательных кодов, разработанных автором.

2.2. Задача оптимизации топливной композиции

Противоположная роль доплеровского коэффициента реактивности в безопасном завершении аварийных режимов, инициированных снижением расхода теплоносителя через активную зону и вводом положительной реактивности, в реакторах большой и средней мощности с оксидным топливом, создает серьезные трудности при проектировании безопасных установок. При переходе на мононитридное топливо эта противоположная роль отчасти выравнивается, сглаживается, но не исключается. Одинаковая роль достигается при использовании металлического топлива. Однако такое топливо (даже легированное цирконием) имеет неприемлемо низкую температуру плавления.

Простейший вид зависимости производной средней (по объему) температуры топлива по времени (dT/dt) от плотности γ и удельной теплоемкости c_p топлива при постоянном давлении можно получить из нестационарного уравнения теплопроводности, записанного в простейшей форме: $dT/dt \sim [A + B\gamma]/c_p$, где A и B – некоторые параметры, косвенно зависящие от γ и c_p . Отсюда следует, что для ограничения роста температуры топлива в аварийных режимах необходимо повышать теплоемкость и плотность топлива. Для снижения температур также необходимо увеличивать теплопроводность топлива.

Итак, задача сводится к выбору свойств топлива, гарантирующих одинаковую роль доплеровского коэффициента реактивности в разных аварийных ситуациях и высокую (приемлемую) температуру плавления топлива.

Исходные данные – компоновка реактора, полученная при решении задачи оптимального проектирования (или компоновка, принятая в концептуальном проекте). Управления задачи – плотность, теплоемкость и теплопроводность топлива. Рассматриваются ограничения для всех функционалов задачи оптимального

проектирования (надежности, безопасности и другие). Критерий оптимальности может отсутствовать.

Необходимо дальнейшее повышение плотности и теплопроводности топлива по сравнению с моонитридом. Это возможно при переходе к металлокерамическому топливу на основе моонитридного и металлического. Однако температура плавления такого топлива заметно снижается при повышении доли металлического урана и (или) плутония. Задача состоит в необходимости повысить плотность и теплопроводность топлива без заметного снижения (в идеале – с сохранением на постоянном уровне) максимально допустимой температуры.

При получении оптимального или предпочтительного решения необходим поиск реальных топливных композиций, обладающих полученными (т. е. уже определенными, заданными) свойствами. Здесь возможны технологические ограничения, связанные с изготовлением топлива.

Итак, для достижения необходимых свойств требуется переход от керамического к металлическому или металлокерамическому топливу без уменьшения температуры плавления. В первом приближении можно считать, что при уменьшении доли неметаллического разбавителя в керамике уменьшается температура плавления или термического разложения топлива, но повышается плотность, теплоемкость и теплопроводность.

2.3. Особенности плутония

Наибольшие отклонения от монотонной линейной зависимости температуры плавления от доли кислорода в составе топлива наблюдаются для плутония (рис. 1). Авторы [9] справедливо называет плутоний элементом со странными свойствами, мечтой физиков и кошмаром для инженеров. При незначительном воздействии плотность плутония может измениться на 25 %, может быть хрупким, как стекло, и пластичным, как алюминий. Температурное расширение и сжатие металлического плутония соответствует изменению плотности более чем на 20 %. В твердом состоянии плутоний имеет шесть видов кристаллической решетки, существенно различающиеся плотностью [9, 10].

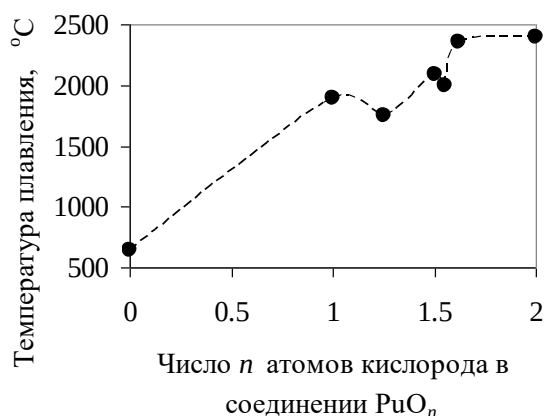


Рис. 1. Зависимость температуры плавления оксида плутония от числа атомов кислорода (без учета неопределенностей).

Для плутония характерно сложное химическое поведение [11]. Недостаточность информации о химической активности и электронной структуре атома затрудняет управление химическим поведением плутония [11].

При нагревании PuO_2 постепенно разлагается, переходя в оксиды с меньшим содержанием кислорода: последовательно восстанавливается до Pu_4O_7 ($\approx PuO_{1,8}$), $PuO_{1,67}$ (смесь Pu_2O_3 и Pu_4O_7), затем до $PuO_{1,55}$, $PuO_{1,5}$ (Pu_2O_3), $PuO_{1,25}$ и PuO [6]. В конечном итоге монооксид восстанавливается до металла. Наиболее химически стойкий оксид

плутония Pu_4O_7 не разлагается при 1550°C в вакууме [10]. Именно эти оксиды и металл рассматриваются в качестве реперных точек на рис. 1. Следует заметить, что монооксид разлагается при относительно низких температурах [10].

В итоге при анализе использования смешанного уран-плутониевого топлива следует учитывать большие неопределенности исходных данных.

2.4. Конфликтный характер оптимизации топливной композиции

Уменьшение максимально допустимой температуры топлива ведет к заметному снижению, а увеличение плотности и теплопроводности топлива — к заметному повышению самозащищенности реактора, в том числе за счет достижения одинаковой роли доплеровского коэффициента реактивности в разных аварийных ситуациях. Поставленная задача носит ярко выраженный конфликтный характер.

Математическое моделирование аварийных режимов показало, что для обеспечения одинаковой роли доплеровского коэффициента реактивности в разных аварийных ситуациях необходима плотность и теплопроводность топлива, более высокая по сравнению с моноксидом. В тоже время допустимы значения плотности и теплопроводности, заметно меньшие, чем для металлического топлива. Переход на «классическую» металлокерамику (керметное топливо) позволит оптимизировать плотность и теплопроводность, обеспечить одинаковую роль доплеровского коэффициента в разных аварийных ситуациях, но ведет к недопустимому снижению максимально допустимой температуры топлива.

2.5. Разрешение конфликта. Результаты

Как разрешить конфликт в получении необходимых (заданных) свойств топлива при использовании металлокерамики? На помощь приходят нанотехнологии. Нанотехнологии активно используют при производстве конструкционных материалов ядерной техники, в частности, оболочек твэлов реакторов типа БН, предлагают к использованию при изготовлении ядерного топлива [12–14].

Рассмотрим возможности и технологические ограничения использования нанотехнологий в разрешении конфликта. Традиционно ядерное топливо, как правило, изготавливают в виде спеченных таблеток, содержащих микрозерна керамики (оксида или нитрида тяжелого металла). Плотность керамического топлива ниже теоретической на 25 %, т. е. пористость такого топлива относительно высока (25 %). Пористость топлива, изготовленного из наноразмерного порошка моноксида урана, можно снизить до 5 % [15, 16]. Значит, есть возможности использовать смесь микрозерен керамики и нанопорошка металла. Нанопорошок металлического урана можно разместить в порах микрозернистого керамического топлива. В этом случае нанопорошок может составить до 20 % объема ядерного топлива (рис. 2). При длительной работе при высоких температурах некоторые наноматериалы (нанопорошки) имеют тенденцию к объединению в более крупное объемное образование. В данном случае это не имеет значения. Температура плавления металлического урана намного ниже керамики. Если нанопорошок заполняет поры между микрозернами керамики, то и это не имеет значения. В аварийных режимах возможно образование жидких капель между твердыми микрозернами, что не представляет опасности. Это практически не отразится на максимально допустимой температуре топлива: она по-прежнему достаточно высока и соответствует максимально допустимой температуре керамики.

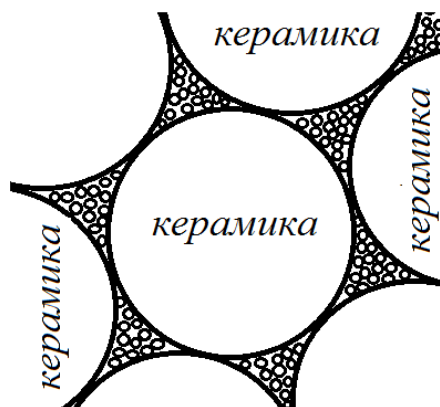


Рис. 2. Схема практически идеального размещения нанопорошка урана в порах между микрочастицами керамики (сферическая форма частиц – идеализация, характерный размер зерен нанопорошка металлического урана – десятки нанометров).

При увеличении доли нанопорошка в топливе, между микрочастицами керамики появится зазор, заполненный нанопорошком. В этом случае максимально допустимая температура топлива будет определяться уже не керамикой, а металлом. Это недопустимо. По существу, это и есть основное технологическое ограничение использования нанотехнологий в производстве металлокерамического топлива. При необходимости увеличить долю металлического урана можно изготавливать более крупные зерна керамики.

Плотность смешанного мононитридного топлива около 13 г/см^3 , плотность металлического урана около 19 г/см^3 . В этом случае отношению объемов микрочастиц керамики и нанопорошка металла 20/75 соответствует отношение масс 0,39. Это максимально допустимое массовое содержание металлического нанопорошка в топливе, связанное с ограничением максимально допустимой температуры.

Для сохранения коэффициента размножения нейтронов при переходе от MN к MN-U-топливу следует использовать нанопорошок обогащенного урана. Например, для реактора типа БРЕСТ-ОД-300 [17] с MN-топливом на основе отработанного урана и «гражданского» плутония (извлеченного из отработавшего топлива ВВЭР-1000), охлаждаемым природным жидким свинцом, металлический уран необходимо обогатить до 14,9 %.

Заметим, что нанопорошок урана заполняет поры между зернами керамики (MN), не замещая мононитрид. Таким образом, в результате пористость топлива уменьшается с 25 до 5 %, а доля тяжелых атомов возрастает, т. е. увеличивается объемная доля тяжелого металла и делящегося материала в твэле при сохранении его размеров. В итоге увеличивается тепловая мощность реактора приблизительно на 20 %. Нанопорошок металлического урана – хороший геттер свободного азота, выделяющегося из MN-топлива при работе реактора и мигрирующего к оболочке [14]. В присутствии свободного азота увеличивается скорость коррозии внутренней поверхности оболочек твэлов. Добавки нанопорошка металлического урана к MN-топливу способствует минимизации скорости коррозии внутренней поверхности оболочек, повышая надежность твэлов, и, значит, реактора в целом.

Переход от керамики к металлокерамике ведет к увеличению средней энергии нейтронов в реакторе. Более жесткий спектр, в свою очередь, приводит к снижению по абсолютному значению доплеровского коэффициента реактивности (см. табл.).

Рисунок 3 иллюстрирует зависимость доплеровского эффекта реактивности (при отсутствии утечки нейтронов) при изменении температуры металлокерамического топлива от 0 до $\pm 100 \text{ К}$ от номинальной при изменении объемной доли металлического урана от 0 до 20 % (указаны % объема). Пористость керамического (MN и MOX) топлива – 75 %, U-топлива (изготовленного из нанопорошка) – 95 %.

Доплеровский коэффициент реактивности при отсутствии утечки нейтронов и спектральная составляющая ПЭР

Объемные доли составляющих топлива, %			Доплеровский коэффициент реактивности, K^{-1}	Спектральная составляющая ПЭР, β
Доля микропорошка керамики	Доля нанопорошка металла (U)	Доля пустот в топливе (пористость)		
75 (MOX)	0	25	$-0,39776 \cdot 10^{-5}$	23,685
75 (MOX)	20	5	$-2,82995 \cdot 10^{-5}$	15,806
75 (MN)	0	25	$-1,75169 \cdot 10^{-6}$	14,289
75 (MN)	5	20	$-1,75099 \cdot 10^{-6}$	13,582
75 (MN)	20	5	$-1,31367 \cdot 10^{-6}$	11,962
0	95	5	$-4,37490 \cdot 10^{-7}$	-15,625

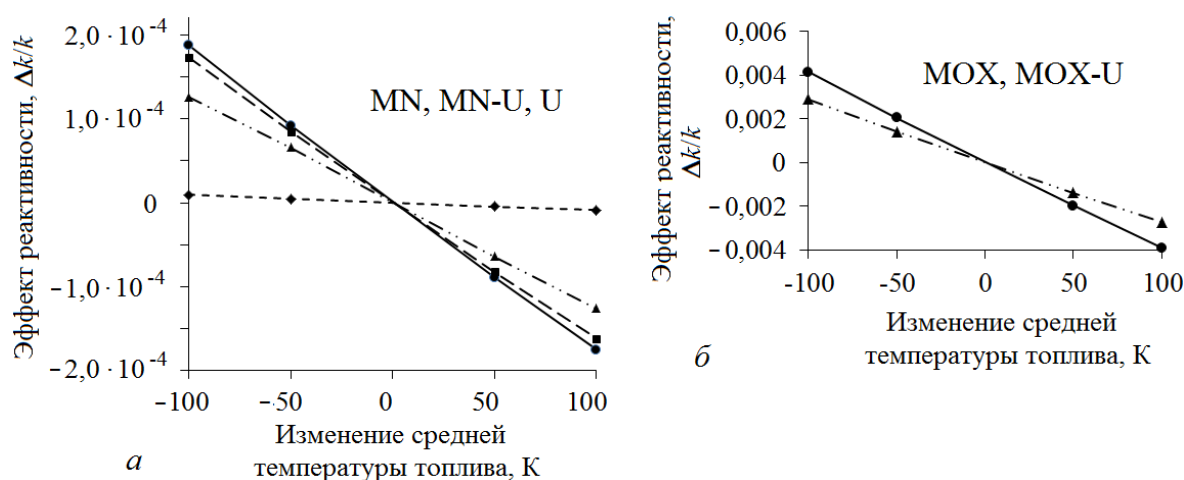


Рис. 3. Доплеровский эффект реактивности при использовании топлива:

(а) MN (●, сплошная линия), MN-5 % U (■, пунктир), MN-20 % U (▲, штрихпунктирная линия), U (♦, короткий пунктир);
 (б) MOX (●, сплошная линия), MOX-20 % U (▲, штрихпунктирная линия)

Расчеты показывают, что одинаковая роль доплеровского коэффициента реактивности в разных аварийных режимах (инициированных снижением расхода и вводом положительной реактивности) может быть достигнута не только при использовании металлического (включая легированное) топлива, но и для металлокерамики при массовой доле металлического урана в смешанной моноснитридном топливе на уровне 39 %. При этом незначительно снижается ПЭР (главным образом, за счет уменьшения его спектральной составляющей, см. табл. 1) и улучшается нейтронный баланс. Для компенсации (поглощения) избыточных по отношению к реализации цепной реакции деления нейтронов можно использовать дополнительный поглотитель в активной зоне. Если вынос этого поглотителя из активной зоны при потере или уменьшении плотности теплоносителя невозможен, то наличие дополнительного поглотителя позволит заметно снизить ПЭР. При использовании MOX-топлива и MOX с добавками 20 % (по объему) нанопорошка U спектральная составляющая ПЭР равна 23,685 β и 15,806 β соответственно.

Европейские проекты быстрых реакторов со свинцовым охлаждением ориентированы на использование MOX-топлива [18]. Подобные новшества можно предложить и для оксидного топлива, размещая нанопорошок металлического урана между микрочастицами оксида.

2.6. Роль вольфрамовых покрытий конструкционных материалов

Поглотитель может быть размещен в виде покрытий твэлов. В работах [19, 20] рассматривается возможность использования твэлов с вольфрамовыми покрытиями, нанесенными с помощью низкотемпературного плазменного напыления. Изначально целью использования таких покрытий была минимизация скорости коррозии и эрозии конструкционных материалов в жидком свинце. В нашем случае такие покрытия способствуют заметному снижению ПЭР в реакторах большой мощности.

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента размножения нейтронов для бесконечной решетки твэлов реактора типа БРЕСТ-ОД-300 от массового содержания вольфрама в конструкционной стали активной зоны. В качестве теплоносителя рассматривался природный свинец (1,4% ^{204}Pb – 23,6% ^{206}Pb – 22,6% ^{207}Pb – 52,4% ^{208}Pb) и свинец, извлеченный из ториевых руд, с максимальным содержанием ^{208}Pb (около 98 %).

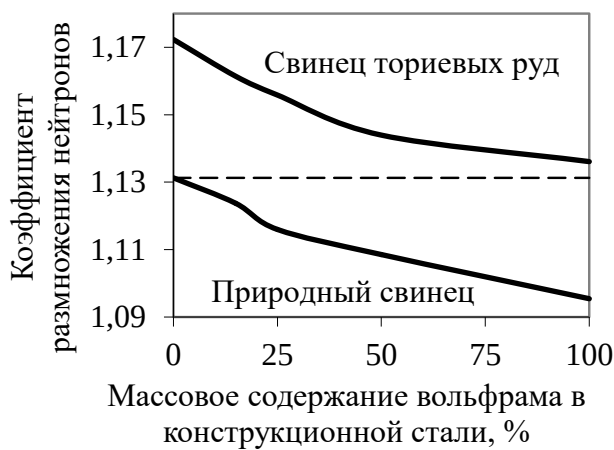


Рис. 4. Зависимость коэффициента размножения нейтронов от массового содержания вольфрама в конструкционной стали активной зоны (по данным [19])

Таким образом, при использовании металлокерамического топлива на основе микрозерен MN и нанопорошка металлического урана, задача повышения мощности, надежности и безопасности реактора не носит конфликтного характера. Более того, повышение самозащитенности ведет к увеличению мощности и надежности.

Повышение тепловой мощности на 20 % при прочих равных условиях потребует увеличения расхода теплоносителя через активную зону на такую же величину (20 %). Это, в свою очередь, способствует повышению скорости коррозии и эрозии конструкционных материалов в жидком свинце. Для минимизации этой скорости и снижения ПЭР ранее предлагалось использовать вольфрамовые покрытия конструкционных материалов [19, 20].

Для повышения коррозионной стойкости внутренней поверхности оболочек твэлов БРЕСТ авторы [21] предлагают использовать подслои между топливом и оболочкой, содержащий жидкий свинец, легированный магнием (до 3 % мас.) и цирконием (до 0,2 %). Такой материал совместим с материалом оболочки и способствует самопроизвольному формированию на внутренней поверхности оболочки твэла защитного покрытия ZrN (ZrC) и самозалечивания его случайных повреждений [21]. Проведены экспериментальные исследования при температурах 690...1133 К [21].

Оптимальным вариантом можно считать использование контактного подслоя на основе свинца с добавками магния и циркония [21] и вольфрамовое покрытие внешней поверхности твэла.

2.7. Конструкционные материалы

Известно, что нанодобавки некоторых оксидов к конструкционным сталям позволяют получить материалы с отрицательной теплоемкостью. Это уникальное свойство наноматериалов (Y_2O_3 , TiO_2 и др.) используется при изготовлении радиационно-стойких жаропрочных конструкционных материалов реакторов с натриевым охлаждением (БН-600, БН-800) [19, 20].

2.8. Теплоноситель

На первом этапе решения оптимизационных задач было получено, что по совокупности критериев жидкий свинец является одним из наиболее предпочтительных теплоносителей быстрых реакторов [22]. Второй этап требует решения локальной задачи оптимизации свинцового теплоносителя в рамках разрабатываемой концепции реактора. Технологические добавки (микро и макро) к свинцовому теплоносителю позволяют решить некоторые задачи, но и создают ряд дополнительных проблем [20]. В использовании нанотехнологий нет необходимости.

Актуальна задача оптимизации изотопного состава свинца, не требующая разделения изотопов. Известно, что ^{206}Pb , ^{207}Pb и ^{208}Pb – продукты распада ^{238}U , ^{235}U и ^{232}Th соответственно. Изотоп ^{204}Pb имеет нерадиогенное происхождение. Его концентрация в природе невелика. Урановые руды характеризуются повышенным содержанием ^{206}Pb и ^{207}Pb и малым содержанием ^{208}Pb в свинце, ториевые – повышенным содержанием ^{208}Pb . Смешивая свинец разных месторождений и (или) разных проб одного месторождения, можно получить непрерывный спектр изменения концентраций стабильных изотопов свинца, т. е. свинец любого (заданного) изотопного состава.

Управления задачи – концентрации стабильных изотопов свинца в теплоносителе. Критерий оптимальности локальной задачи определяется объемом активной зоны и, соответственно, мощностью установки. Для реакторов малой мощности предпочтителен теплоноситель на основе свинца-206. Его использование позволяет минимизировать наработку полония-210 (критерий оптимальности). В реакторах большой мощности следует использовать теплоноситель на основе дважды магического изотопа свинца-208. Это позволит существенно снизить критерий оптимальности – ПЭР (за счет малого сечения неупругих процессов: поглощения и неупругого рассеяния нейтронов), увеличить время жизни мгновенных нейтронов (за счет малого сечения поглощения) и, как следствие, снизить опасность реактивных аварий (второй критерий оптимальности). Большой пробег нейтронов в свинце-208 потребует увеличить размер отражателей нейтронов или использовать в отражателях материалы с большим сечением поглощения, чем сталь, например, технеций-99 совместно с углеродом-14 (замедляющим нейтроны в отражателе и повышающим эффективность трансмутации ^{14}C и ^{99}Tc) – долгоживущие радиоактивные отходы ядерной энергетики, подлежащий утилизации.

Расчеты по «MCNP» показывают, что для реакторов типа БРЕСТ бесконечно большой мощности с MN-топливом содержание ^{208}Pb в свинцовом теплоносителе должно быть не менее 80...85 %. При использовании вольфрамовых покрытий оболочек твэлов и топлива на основе микрозерен MN и нанопорошка металлического урана подходит свинец с концентрацией изотопа ^{208}Pb более 70...75 %, что соответствует минимальной концентрации этого изотопа в известных пробах свинца, извлеченного из ториевых руд (рис. 5). Таким образом, в качестве теплоносителя может использоваться свинец, извлеченный из любого месторождения тория.

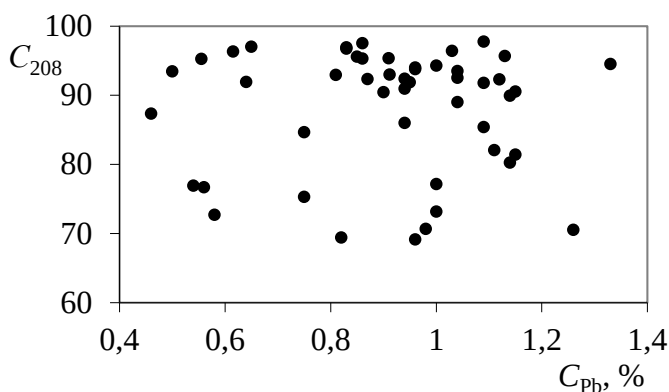


Рис. 5. Типичная зависимость содержания C_{208} изотопа ^{208}Pb в свинце от содержания C_{Pb} свинца в монаците (по данным [23])

Заключение

После определения основных характеристик реактора на стадии концептуальной разработки актуальна формулировка и решение новых (локальных) задачи оптимизации. Это позволит скорректировать проектные решения в рамках разработанной (заданной) компоновки активной зоны. Такая корректировка в большинстве случаев не требует изменения основных параметров компоновки, т. е. не требует решения задач оптимизации геометрии и состава активной зоны. Результаты решения локальных корректирующих задач могут не иметь возможности практической реализации. Однако если практическая реализация выполнима, можно ожидать не просто усовершенствования ядерных технологий, но и технологических прорывов, причем в рамках существующих технологий, разработанных ранее.

Оптимизация свойств топливных материалов привела к выбору в качестве предпочтительного топлива металлокерамику на основе микрозерен MN и нанопорошка металлического урана. При использовании такого топлива задача повышения мощности, надежности и безопасности реактора не носит конфликтного характера. Возможно одновременное улучшение всех этих качеств. Наибольших успехов в развитии энергетических быстрых реакторов большой мощности следует ожидать при комплексном использовании такого топлива, свинцового теплоносителя с высокой концентрацией ^{208}Pb и вольфрамовых (или других, поглощающих нейтроны) покрытий конструкционных материалов.

Предложенный подход универсален. Он одинаково применим при разработке новой высокотемпературной техники, предназначенной для использования в особых условиях на земле и в космосе, в том числе при высоких радиационных воздействиях (включая солнечный ветер, облучение нейтронами и γ -квантами). Это ракетные двигатели (ядерные и неядерные) и материалы ракетной техники, материалы ядерной и термоядерной техники (топливо, теплоноситель, конструкционные материалы).

Список литературы

1. Окунев В.С. Построение детерминированных аналогов для оптимального проектирования реакторных установок в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, серия «Естественные науки». №3. 2012. С. 57–75.
2. Окунев В.С. Способ построения детерминированных аналогов для решения задач оптимизации быстрых реакторов нового поколения в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций // Иннов. проекты и технологии ядерной энергетики. Межд. науч.-техн. конф. М., ОАО «НИКИЭТ». 2012. С. 456–467.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. Пер. с англ. — М.: Мир. — 1975. 536 с.
4. Наука и жизнь. 1988. №4. С. 109.

5. Смирнов А.А. Психология. М.: Учпедгиз. 1962. 556 с.
6. Кузьмин А.М., Окунев В.С. Программно-методическое обеспечение для решения задач оптимизации компоновок ядерных реакторов нового поколения // Известия РАН. Энергетика. 1996. №5. С.66–74.
7. MCNP-4C. Monte Carlo N-Particle Transport Code System / ORNL, RSICC Computer Code Collection. CCC-700. April 2000.
8. WIMS-D/4. Energy Science and Technology Software Center. NEA Data Bank. United Kingdom Atomic Energy Authority. Reactor Group / Winfrith. Dorchester. Dorset. 1967.
9. Зигфрид С. Хеккер. Плутоний. Исторический обзор // Плутоний. Фундаментальные проблемы. Los Alamos Science. 2000. No 26. Vol. 1. PP. 16–23.
10. Плутоний. Справочник. Т.2. Под ред. О. Вика. Пер. с англ. под ред. Н.Т. Чеботарева. М. Атомиздат. 1973.
11. Дэвид Л. Кларк. Сложность химического поведения плутония // Плутоний. Фундаментальные проблемы. Los Alamos Science. 2000. No 26. Vol. 2. PP. 366–383.
12. Половинкин В.Н. Нанотехнологии в энергетике // Агентство PROATOM. 11.01.2010. (<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2118>)
13. Наноструктурные материалы в ядерной энергетике / Азаренков Н.А., Воеводин В.Н., Кириченко В.Г., Ковтун Г.П. // Вісник Харківського університету. Серія: фізична «Ядра, частинки, поля». 2010. № 887. Вып. 1 (45). С. 4–24.
14. Okunev V.S. Nanotechnology in nuclear power engineering: pellet cermet MOX-U and MN-U-fuel for fast reactors // Innovate Design and Technologies of Nuclear Power. VI Int. Scientific and Tech. Conf., 2016, Moscow. JSC NIKIET, vol. 1, p. 195–206.
15. Получение и компактирование методами плазменно-искрового и электроимпульсного спекания нанопорошков нитрида урана / Шорников Д.П., Бурлакова М.А., Тарасов Б.А. и др. // Вектор науки ТГУ. 2013. №3. С. 95–98.
16. Tokita M. Development of Advanced Spark Plasma Sintering (SPS). Systems and its Applications // Ceramic Transaction. 2006. Vol. 194. PP. 51–60.
17. Orlov V.V., et. al. Deterministic Safety of BREST Reactors // 11-th Int. Conf. on Nucl. Engrg. (ICONE-11). Shinjuku, Tokyo, Japan; 2003. (CD-ROM file ICONE11-36412).
18. Alemberti A., et. al. In: Proceedings of the V Conf. Innovative Design and Technologies of Nuclear Power; 2–5 October 2018; Moscow; NIKIET; Vol. 1, p. 20–28.
19. Okunev V.S. Substantiation of the Feasibility of Using Fuel Rods with Tungsten Spraying in Power Fast Reactors of New Generation // Thermal Engineering, 2011. Vol. 58, No. 14, pp. 1167–1171.
20. Окунев В.С. О возможности дальнейшего приближения к идеалам естественной безопасности в рамках концепции энергетического реактора «БРЕСТ» большой мощности // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Международная научно-техническая конференция «МНТК НИКИЭТ–2012»: сборник тезисов докладов. — М.: ОАО «НИКИЭТ». 2012. С. 31–32.
21. Orlov M.A., Orlov V.V., Orlova E.A. Harmonization of the Nitride Fuel Element Properties by Means of a Corrosion-Resistant Heat-Conducting Pb-Mg-Zr Sublayer // Innovative Design and Technologies of Nuclear Power, 5th Int. Scientific and Technical Conference. Russia, Moscow, JSC NIKIET, 2018, pp. 473-482.
22. Окунев В.С. Комплексный сравнительный анализ использования жидких металлов и их сплавов для охлаждения быстрых реакторов // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Третья Международная научно-техническая конференция: доклады. — М.: ОАО «НИКИЭТ». 2014. Т.1. С. 291–302.
23. Шербак Н.П. и др. Каталог изотопных дат пород Украинского щита / Академия наук Украинской ССР. Институт геохимии и физики минералов. Министерство геологии УССР. Киев: «Наукова думка». 1978. С.90, 136.