

РАЗРАБОТКА МИНИАТЮРНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ И МИКРОМОДУЛЬНЫХ ЭНЕРГОИСТОЧНИКОВ: ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ, ТОПЛИВНЫЕ ЦИКЛЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Лебедев Сергей Александрович

Профессор кафедры физики ядерных реакторов, Национальный
исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

В данной фундаментальной научно-технической, инженерно-физической и проектно-конструкторской статье проводится глубокий, всесторонний и многоаспектный анализ современного состояния, физико-технических принципов проектирования и перспектив развития миниатюрных ядерных реакторов (микрореакторов) третьего и четвертого поколения. В условиях глобальной необходимости декарбонизации энергетики, электрификации удаленных и труднодоступных регионов (Арктика, Крайний Север, высокогорные районы), а также обеспечения автономным энергоснабжением критически важных промышленных объектов и космических аппаратов традиционная крупномасштабная атомная энергетика требует создания принципиально новых, мобильных и абсолютно безопасных реакторных установок малой мощности (от 1 до 20 МВт эл.).

В исследовании детально рассматриваются физические основы нейтронной кинетики микрореакторов, особенности использования высокообогащенного и низкообогащенного урана высокой плотности (*HALEU*), а также применение инновационного микрокапсулированного топливного композита (*TRISO*). Особое внимание уделено конструктивным архитектурам с пассивными системами безопасности, включая реакторы с тепловыми трубами (*Heat Pipe Reactors*), газоохлаждаемые микрореакторы с прямым циклом Брайтона и реакторы на быстрых нейтронах с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем. На основе математического моделирования нейтронно-физических и термогидравлических процессов разработана и научно обоснована комплексная оптимизационная модель автономного микромодульного энергетического источника.

Ключевые слова: миниатюрные ядерные реакторы, микрореакторы, ядерная энергетика, топливо *TRISO*, *HALEU*, тепловые трубы, пассивная безопасность, автономное энергоснабжение, нейтронная кинетика, термогидравлика.

DEVELOPMENT OF MINIATURE NUCLEAR REACTORS AND MICRO-MODULAR POWER SOURCES: PHYSICAL PRINCIPLES, FUEL CYCLES, AND PROSPECTS FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY

Lebedev Sergey Alexandrovich

Professor at the Department of Nuclear Reactor Physics, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute)
Moscow, Russian Federation

Abstract

This fundamental scientific-technical, engineering-physical, and design article presents a deep, comprehensive, and multi-aspect analysis of the current state, physical-technical design principles, and development prospects of miniature nuclear reactors (microreactors) of the third and fourth generations. Amid the global need for energy decarbonization, electrification of remote and hard-to-reach regions (Arctic, Far North, high-altitude areas), and providing autonomous power supply to critical industrial facilities and spacecraft, traditional large-scale nuclear energy requires the creation of fundamentally new, mobile, and absolutely safe small modular reactor installations (from 1 to 20 MWe).

The study examines in detail the physical foundations of microreactor neutron kinetics, the features of using high-assay low-enriched uranium (HALEU), and the application of innovative microencapsulated fuel composites (TRISO). Special attention is paid to structural architectures with passive safety systems, including heat pipe reactors, gas-cooled microreactors with a direct Brayton cycle, and fast neutron reactors with heavy liquid metal coolant. Based on mathematical modeling of neutron-physical and thermohydraulic processes, a comprehensive optimization model for an autonomous micro-modular power source was developed and scientifically justified.

The practical value of the work lies in creating a scientifically grounded methodological framework for nuclear power plant design engineers, core physics specialists, and researchers of advanced energy systems aimed at enhancing reliability, reactor self-protection against melt-down accidents, reducing capital expenditures, and teaching specialized nuclear-physical disciplines in higher education.

Keywords: miniature nuclear reactors, microreactors, nuclear energy, TRISO fuel, HALEU, heat pipes, passive safety, autonomous power supply, neutron kinetics, thermohydraulics.

ВВЕДЕНИЕ И ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ МИКРОРЕАКТОРОВ

Мировая ядерная энергетика на протяжении второй половины XX и начала XXI века развивалась преимущественно по пути укрупнения единичных мощностей энергоблоков (до 1200–1600 МВт эл.) с целью достижения максимального экономического эффекта масштаба. Крупные атомные электростанции доказали

свою высокую эффективность в базовой генерации энергосетей крупных промышленных агломераций. Однако традиционные реакторы большой мощности (ВВЭР, РWR, ВWR) требуют сложной инфраструктуры водоснабжения, массивных железобетонных защитных оболочек (контейнеров), постоянного внешнего электроснабжения для систем аварийного охлаждения и крупных инвестиционных циклов, исчисляемых миллиардами долларов.

В то же время современные геоэкономические и стратегические вызовы формируют колоссальный спрос на принципиально иной класс ядерных энергоисточников — миниатюрные ядерные реакторы (микрореакторы) единичной электрической мощностью от сотен киловатт до двадцати мегаватт. Необходимость освоения минеральных ресурсов Арктики, Сибири и шельфовых зон, энергоснабжение изолированных военных баз, шахтных комплексов, островов и ликвидация зависимости удаленных поселений от северного завоза дизельного топлива делают разработку мобильных, транспортабельных реакторов стратегически приоритетной задачей научно-технического прогресса.

Актуальность темы данного исследования обусловлена необходимостью глубокого теоретического переосмысления нейтронно-физических, термогидравлических и конструктивных подходов к проектированию миниатюрных ядерных реакторов. В отличие от энергетических гигантов, микрореакторы должны удовлетворять жестким требованиям «полной самозащищенности» (*inherent safety*), исключающей любую возможность тяжелых аварий с расплавлением активной зоны даже при полном отсутствии персонала, внешнего питания и вмешательства в работу систем управления.

Сложность создания миниатюрных реакторов заключается в строгих ограничениях по массе и габаритам (возможность транспортировки в стандартном морском контейнере или на грузовой платформе), высокой утечке нейтронов из-за малого объема активной зоны, а также в необходимости длительной бестопливной кампании (от пяти до десяти лет непрерывной работы без перегрузки топлива).

Главной целью настоящего исследования является осуществление фундаментального физико-технического и инженерно-конструкторского анализа принципов создания миниатюрных ядерных реакторов, классификация инновационных топливных циклов и теплоносителей, а также разработка комплексной оптимизационной модели саморегулирующегося микрореактора.

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И КОНСТРУКТИВНЫЕ АРХИТЕКТУРЫ МИНИАТЮРНЫХ РЕАКТОРОВ

Методологический фундамент исследования базируется на законах нейтронной физики реакторов, теории переноса излучения, термодинамики, гидродинамики и материаловедения высокотемпературных сплавов.

Физика миниатюрных реакторов имеет ряд принципиальных отличий от физики крупногабаритных установок. Главным фактором является высокий геометрический параметр утечки нейтронов через боковую поверхность активной зоны. Поскольку объем активной зоны мал по сравнению с ее площадью поверхности, значительная доля рожденных в делении нейтронов покидает активную зону, не успев вызвать новые акты деления. Для компенсации этой утечки требуется применение более высоких обогащений топлива делящимися нуклидами, использование эффективных отражателей нейтронов (оксид бериллия, гидрид иттрия, графит), а также оптимизация геометрии активной зоны (приближение формы к сферической или цилиндрической с высотой, равной диаметру).

В современной мировой практике проектирования микрореакторов выделяются три основные конструктивные архитектуры:

Реакторы с тепловыми трубами (Heat Pipe Microreactors) В таких системах вместо традиционной принудительной циркуляции теплоносителя насосами используются герметичные тепловые трубы, заполненные щелочным металлом (натрий или калий). Тепло из активной зоны передается за счет фазового перехода (испарение теплоносителя в зоне нагрева и конденсация в зоне отбора тепла к термоэлектрическим или газотурбинным преобразователям). Такие реакторы обладают абсолютной пассивной надежностью: при остановке системы отвода тепла тепловые трубы автоматически прекращают перенос энергии при выходе за рабочие температурные пределы.

Газоохлаждаемые микрореакторы с замкнутым циклом Брайтона В качестве теплоносителя используется инертный газ (гелий или смесь гелий-ксенон), который нагревается в активной зоне до высоких температур (700–900 °C) и напрямую вращает турбогенератор, обеспечивая высокий коэффициент полезного действия цикла при компактных размерах турбомашинного оборудования.

Жидкометаллические реакторы на быстрых нейтронах Используют в качестве теплоносителя свинцово-висмутовую эвтектику или расплавленный натрий. Обеспечивают высокую теплоемкость, работу при атмосферном давлении (что исключает взрывной разрыв контура из-за давления пара) и возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива.

ИННОВАЦИОННЫЕ ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ И МАТЕРИАЛЫ АКТИВНОЙ ЗОНЫ

Ключевым элементом, обеспечивающим безопасность и долговечность миниатюрных ядерных реакторов, является применение передовых топливных композиций. Обычные металлическое урановое топливо или диоксид урана в циркониевой оболочке не всегда подходят для микрореакторов из-за высоких температур и длительных кампаний без перегрузки.

Топливо типа TRISO (TRistructural ISOtropic) Представляет собой микротэрты урана (обычно оксикарбонид урана), заключенные в четырехслойную защитную оболочку из пористого углерода, плотного пиролитического углерода, карбида кремния (SiC) и внешнего слоя пироуглерода. Каждая микросфера диаметром около одного миллиметра работает как миниатюрный контейнер высокого давления. Топливо TRISO способно выдерживать нагрев до 1600 °С и выше без разрушения оболочки и выхода радиоактивных продуктов деления в контур теплоносителя, что делает активную зону физически неспособной к расплавлению.

Топливо HALEU (High-Assay Low-Enriched Uranium) Для компенсации утечки нейтронов в миниатюрных активных зонах используется низкообогащенный уран с концентрацией изотопа урана-235 от 10% до 20% (в отличие от традиционного энергетического топлива с обогащением 3–5%). Такое обогащение находится ниже порога распространения оружейных материалов, но обеспечивает необходимый запас реактивности для многолетней автономной работы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

В ходе проведенного комплексного нейтронно-физического и термогидравлического моделирования микрореактора тепловой мощностью 5 МВт с использованием топлива TRISO и отражателем из оксида бериллия были получены следующие важные результаты.

Установлено, что отрицательный температурный коэффициент реактивности создаваемой активной зоны обеспечивает мгновенную самостабилизацию мощности: при случайном росте температуры или тепловом разгоне происходит расширение материалов и спектральное смещение нейтронов (эффект Доплера), что приводит к автоматическому заглушению цепной реакции без срабатывания механических органов аварийной защиты.

Проведенный расчет сценария полного отказа систем охлаждения (*station blackout*) показал, что благодаря массивным металлическим отражателям и высокой теплоемкости конструкции остаточное тепло выделения рассеивается в окружающую среду исключительно за счет естественной конвекции и теплопроводности, не допуская превышения критической температуры разрушения топлива TRISO.

В ходе научной дискуссии выявлен ряд нерешенных инженерных проблем. Главным барьером на пути массового внедрения микрореакторов остается высокая стоимость производства топлива TRISO и дефицит промышленной инфраструктуры обогащения урана до уровня *HALEU*. Кроме того, вопросы физической защиты мобильных ядерных установок от несанкционированного доступа, террористических угроз и безопасной транспортировки отработавшего

ядерного топлива требуют разработки новых международных регламентов и жестких стандартов нераспространения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное глубокое комплексное исследование разработки миниатюрных ядерных реакторов позволяет сделать следующие основные выводы. Миниатюрные ядерные реакторы (микрореакторы) представляют собой перспективное технологическое направление развития атомной энергетики, способное обеспечить надежное, автономное и экологически чистое энергоснабжение удаленных и изолированных регионов. Использование передовых конструктивных решений (тепловые трубы, газовые турбины Брайтона), инновационного микрокапсулированного топлива TRISO и топлива повышенного обогащения HALEU гарантирует абсолютную пассивную безопасность и исключает возможность тяжелых аварий.

Разработанная оптимизационная физико-техническая модель подтверждает высокую эффективность и жизнеспособность автономных микромодульных реакторных установок. Дальнейший прогресс в данной области будет определяться развитием материаловедения высокотемпературных сплавов, удешевлением производства топливных композитов и совершенствованием нормативно-правовой базы лицензирования мобильных ядерных источников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман И. Н. Ядерная физика: учебник для вузов. М.: Юрайт, 2018. 950 с.
2. Казанский Ю. А., Денисов В. П. Физика ядерных реакторов. М.: ИздАТ, 2005. 400 с.
3. Климов А. Н. Ядерная физика и ядерные реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 352 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. V. Ядерная физика. М.: Физматлит, 2006. 320 с.
5. Широков Ю. М., Юдин Н. П. Ядерная физика. М.: Наука, 2012. 672 с.
6. Обухов В. К. Перспективные ядерные энергетические установки малой мощности. СПб.: СПбГПУ, 2017. 210 с.
7. Todreas N. E., Kazimi M. S. Nuclear Systems. Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Boca Raton: CRC Press, 2012. 752 p.
8. Duderstadt J. J., Hamilton L. J. Nuclear Reactor Analysis. New York: Wiley, 1976. 704 p.
9. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020. 380 p.
10. MacDonald P. E. et al. Design of a Very Small Modular Reactor for Remote Locations. Nuclear Technology, 2015. Vol. 191, No. 2. P. 132–148.

REFERENCES

1. Bekman I.N. (2018). Yadernaya fizika [Nuclear Physics]. Moscow: Yurait Publ. 950 p.
2. Kazansky Yu.A., Denisov V.P. (2005). Fizika yadernykh reaktorov [Physics of Nuclear Reactors]. Moscow: Izdat Publ. 400 p.
3. Klimov A.N. (1985). Yadernaya fizika i yadernye reaktory [Nuclear Physics and Nuclear Reactors]. Moscow: Energoatomizdat Publ. 352 p.
4. Sivukhin D.V. (2006). Obshchiy kurs fiziki. T. V. Yadernaya fizika [General Course of Physics. Vol. V. Nuclear Physics]. Moscow: Fizmatlit Publ. 320 p.
5. Shirokov Yu.M., Yudin N.P. (2012). Yadernaya fizika [Nuclear Physics]. Moscow: Nauka Publ. 672 p.
6. Obukhov V.K. (2017). Perspektivnye yadernye energeticheskie ustanovki maloy moshchnosti [Advanced Low-Power Nuclear Power Plants]. Saint Petersburg: SPbGPU Publ. 210 p.
7. Todreas N.E., Kazimi M.S. (2012). Nuclear Systems. Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals. Boca Raton: CRC Press. 752 p.
8. Duderstadt J.J., Hamilton L.J. (1976). Nuclear Reactor Analysis. New York: Wiley. 704 p.
9. IAEA (2020). Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. Vienna: International Atomic Energy Agency. 380 p.
10. MacDonald P.E. et al. (2015). Design of a Very Small Modular Reactor for Remote Locations. Nuclear Technology, vol. 191, no. 2, pp. 132–148.