

УДК 621.039.5

А.В. Кайнова, Ю.П. Сухарев, Г.Н. Власичев

РЕАКТОРНЫЕ УСТАНОВКИ СВЕРХМАЛОЙ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Анализ основных тенденций в проектировании современных реакторов малой мощности.**Методология:** Анализ доступных источников по тематике исследования: статей, материалов конференций, отчетов.**Результаты:** Проведен обзор некоторых из существующих проектов реакторных установок сверхмалой мощности как российских, так и зарубежных. Приведены основные характеристики разрабатываемых реакторов, некоторые особенности их конструкции, а также область их применения и характеристики безопасности. Определена цель дальнейших разработок и задачи, необходимые для достижения поставленной цели.*Ключевые слова:* реакторы малой и сверхмалой мощности, водо-водяные энергетические реакторы, реакторы на быстрых нейтронах, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, реакторы с жидкосольевым теплоносителем.**Введение**

По мере развития ядерной энергетики с 1950-х годов мощность реакторных установок возросла с 60 до более 1600 МВт. Однако наращивание мощности ведет к увеличению массогабаритных характеристик, капиталовложений, количества обслуживающих реакторную установку систем аварийной и нормальной эксплуатации, персонала. Таким образом, для некоторых потенциальных потребителей ядерной энергии строительство крупного реактора оказывалось экономически невыгодным или в судовой энергетике вовсе невозможным. Как следствие, активно развивались и небольшие энергетические реакторы, прежде всего, для использования в составе судовых установок, а также проведения исследовательских работ.

Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) определяет «малые» реакторы как реакторы мощностью до 300 МВт (электрических), «сверхмалые» до 15 МВт.

Сегодня из-за высоких капитальных затрат при строительстве крупных реакторов, а также потребности в обслуживании отдаленных и труднодоступных районов, небольших электрических цепей наблюдается повышение интереса к проектам реакторов малой и сверхмалой мощности. Современные маломощные реакторные установки являются высокотехнологичными, надежными и безопасными в течение длительного срока службы, а также простыми по своему устройству. Кроме того, большинство из них имеют большое количество пассивных систем безопасности, не требующих вмешательства оператора в аварийной ситуации. Многие из проектируемых маломощных установок предназначены для размещения под землей, что обеспечивает высокую защищенность от террористических угроз и хищения делящихся материалов, а также позволяет локализовать выход радиоактивных продуктов.

В докладе Всемирной ядерной ассоциации [1] отмечено, что востребованность маломощных реакторов определяется рядом факторов:

- высокотехнологичность данного типа реакторов позволяет наладить серийное производство, повысив качество и эффективность строительства;
- возможность подземного или подводного размещения обеспечивает защиту от естественных (например, сейсмических) или антропогенных (например, ударных) воздействий;
- малые габариты и высокий уровень самозащищенности позволяют экспортировать реакторы малой мощности в страны, в которых отсутствует собственная ядерная энергетика;

- серийное производство и большое количество пассивных систем безопасности позволяют в разы снизить затраты на строительство по сравнению с крупными реакторами. Согласно отмеченному ранее, область возможного применения маломощных реакторов достаточно обширна, они могут быть использованы:

- в качестве автономных источников электро- и теплоснабжения в труднодоступных и удаленных районах;
- для научных и прикладных исследований студентов вузов ядерного направления;
- как тренажеры для подготовки персонала АЭС (позволяют наиболее полно смоделировать условия работы на атомной станции по сравнению с существующими тренажерами);
- при эксплуатации длительное время в режиме саморегулирования могут быть достаточно востребованы в странах, где отсутствует собственная атомная энергетика либо научно-технический уровень не позволяет постройку собственных станций.

Хорошее представление о разработках маломощных реакторов дают сообщения и доклады, сделанные на секции «Малая атомная энергетика» 10-й конференции Ядерного общества России (1999г.) [2], на Российской конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов «Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей» [3] (2016г.), материалы изданий РНЦ «Курчатовский институт» по истории атомной энергетике Советского Союза и России (2004г.) [4], а также отчет Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (2011г.) [5].

Целью данной работы является анализ основных тенденций в проектировании современных маломощных реакторов. Представлен краткий обзор некоторых из существующих проектов реакторов сверхмалой мощности и предложен концепт реактора, представляющий интерес для дальнейшей разработки.

В данной статье рассмотрены следующие проекты реакторов сверхмалой мощности:

- МАСТЕР (Россия);
- БРУЦ (Россия);
- МАРС (Россия);
- ГРЭМ (Россия);
- ELECTRA (Швеция);
- Rapid-L (Япония);
- U-Battery (Великобритания, Нидерланды).

Российские проекты

Проект реактора **МАСТЕР** (Малогабаритный автономный саморегулируемый теплопроводный реактор) [6] разрабатывается в Институте атомной энергетики г. Обнинска. Реактор представляет собой установку водо-водяного типа, уменьшенную копию ВВЭР-1000. Предназначен для использования на учебных АЭС, также рассматривается возможность экспорта в страны, начинающие освоение ядерной энергетики. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики реактора МАСТЕР

Параметр	Значение
1	2
Мощность реактора (тепловая), кВт	300
Кампания реактора, лет	60
Активная зона	
Высота активной зоны, м	1,6

Радиус активной зоны, м	0,5
-------------------------	-----

Окончание табл. 1

1	2
Материал топлива	UBe ₁₃ +Mg
Обогащение по U-235, %	40
Доля Mg в топливе, %	25
Отражатели	
Толщина радиального отражателя, мм	100
Толщина аксиального отражателя, мм	100
Материал отражателей	Be

Тепло с активной зоны снимается контуром с естественной циркуляцией, теплоноситель – вода высокой чистоты. Для компенсации потери реактивности при выгорании топлива используются стержни выгорающего поглотителя – борированной стали с добавлением 3% природного бора.

Также авторы отмечают, что регулирование мощности реактора обеспечивается за счет введения в реактор контура жидкого поглотителя.

Основным недостатком данной реакторной установки является высокое обогащение топлива, которое по международным стандартам не должно превышать 20%. Высокое обогащение обуславливалось необходимостью минимизации скорости потери реактивности в ходе кампании реактора. В качестве мер по пресечению хищения делящихся высокообогащенных материалов предлагается размещение реакторной установки под землей. Однако разработчиками отмечается, что в дальнейшем будут рассмотрены пути снижения топливного обогащения.

Проект реактора **БРУЦ** (Быстрый реактор для учебных целей) [7] также предложен специалистами Института атомной энергетики г. Обнинска.

Авторами рассматривается возможность создания исследовательского реактора на быстрых нейтронах с моноблочной компоновкой основного оборудования. Данная установка может быть использована в качестве учебной, для обучения аспирантов и студентов принципам обращения с быстрыми реакторами, а также для подготовки специалистов АЭС и научных центров. Рассматривается применение реактора и для прикладных задач, таких как выжигание младших актинидов и производство изотопов. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики реактора БРУЦ

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	0,5
Кампания активной зоны, лет	20
Расчетный срок службы реактора, лет	40
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,62
Радиус активной зоны, м	0,618
Материал топлива	UO ₂

Обогащение по U-235, %	19,7
------------------------	------

В качестве теплоносителя рассматриваются естественный свинец и свинец, обогащенный по изотопу ^{208}Pb . Тепло от реактора отводится за счет естественной циркуляции теплоносителя первого контура.

Разработчиками также предусмотрена система пассивного отвода тепла за счет естественной циркуляции воздуха в зазоре между стенками корпуса и шахты реактора. Данная система обеспечивает отвод остаточного тепла и сброс его в атмосферу как при аварийном, так и штатном расхолаживании БРУЦ.

Проект реактора МАРС (Медицинский америциевый реактор солевой) [8] предложен группой специалистов ЭНИМЦ «Моделирующие системы», ГНЦ РФ – ФЭИ им. А. И. Лейпунского, Института атомной энергетики г. Обнинска, а также Университета им. Бен-Гуриона (Израиль).

Реакторная установка предназначена для лучевой терапии злокачественных образований методами нейтронной и нейтронозахватной терапии. Предполагается размещение реактора непосредственно на площадке онкологической клиники. Основные характеристики установки приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики реактора МАРС

Параметр	Значение
Мощность реактора, кВт	≤ 10
Расчетный срок службы реактора в старт-стопном режиме, ч	400
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,21
Радиус активной зоны, м	0,084
Материал топлива	$\text{Am}_2(\text{SO}_4)_3$
Обогащение по $^{242\text{m}}\text{Am}$, %	> 50

Активная зона располагается в стакане из окиси бериллия, который является отражателем. Для выхода пучка нейтронов один из торцов открыт, на нем размещен фильтр нейтронного пучка. Твэлы представляют собой параллельно расположенные пустотелые диски, соединенные каналами для залива и удаления топлива. Теплосъем осуществляется естественной циркуляцией воды, циркулирующей в межтвэльном пространстве.

Отмечается, что установка имеет три барьера безопасности: Твэлы, прочный корпус с контуром циркуляции теплоносителя и корпус реактора в целом. Функции компенсаторов выгорания, регулирования и аварийной защиты выполняют шесть поглощающих стержней из бериллия и карбида бора.

Авторы отмечают технологическую сложность получения высокого обогащения по изотопу $^{242\text{m}}\text{Am}$, в связи с чем в [9] приведены исследования других возможных топливных композиций. По результатам расчетов, с целью повышения безопасности и технологичности, решено использовать в качестве топлива диоксид урана с обогащением по ^{235}U не более 20%. С позиции экономической привлекательности твэлы в виде дисков-пластин заменены на цилиндрические.

Проект реактора ГРЭМ [10] разработан специалистами НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала (г. Москва).

Реакторная установка создавалась для транспортабельной атомной станции сверхмалой мощности на основе технологий, созданных НИКИЭТ для установок космического бази-

рования. Основное назначение ГРЭМ – тепло- и электроснабжение локальных потребителей, в основном объектов инфраструктуры бытового и промышленного назначения.

ГРЭМ представляет собой высокотемпературный быстрый газоохлаждаемый реактор с активной зоной на основе наноструктурированного карбонитридного топлива, разработанного в рамках программы развития космической энергетики. Теплоноситель – гелий-ксеноновая смесь, позволяющая обеспечить минимальные массогабаритные характеристики. Тепловая мощность реактора составляет 2,6 МВт, электрическая – 1 МВт. Срок эксплуатации установки – до 25 лет без перегрузок топлива.

Транспортировка установки предполагается на трех полуприцепах ЧМЗАП-99990 на базе тягача МАЗ-537 «Уран».

Вопросы о расположении и составе радиационной защиты на данный момент прорабатываются.

Зарубежные проекты

Проект реактора **ELECTRA** (European Lead Cooled Training Reactor) [11] предложен шведскими инженерами из Королевского технологического института г. Стокгольма (Швеция).

ELECTRA – маломощный реактор на быстрых нейтронах, предназначенный для учебных целей: исследований динамики быстрых реакторов, технологий топливного цикла, подготовки операторов АЭС. Данная реакторная установка относится к IV поколению. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 4.

Отмечается, что плутоний для топливной композиции данного реактора может быть использован из отработанного уранового топлива. В качестве теплоносителя первого контура используется свинец со 100%-ным уровнем естественной циркуляции. Компенсация избыточной реактивности осуществляется за счет специальных конструкций – вращающихся «барбанов», расположенных по периметру активной зоны и заполненных выгорающим поглотителем В₄С. Обогащение по бору составляет 90%.

Таблица 4

Характеристики реактора ELECTRA

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	0,5
Кампания активной зоны (на полной мощности), лет	15
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,3
Радиус активной зоны, м	0,15
Материал топлива	(Pu _{0,4} Zr _{0,6})N
Содержание ¹⁵ N в топливе, %	90

Проект реактора **Rapid-L** (Refueling by All Pins Integrated Design) [12] разработан в Японском институте атомной энергии.

Rapid-L – реактор сверхмалой мощности на быстрых нейтронах. Изначально проектировался для использования в качестве источника энергии на Луне. Также в сети Интернет [13] появлялись сообщения о намерениях японских инженеров использовать данный реактор в качестве источника электро- и теплоснабжения офисных зданий и многоквартирных домов. Основные характеристики реактора Rapid-L приведены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики реактора Rapid-L

Параметр	Значение
Мощность реактора (тепловая), МВт	5
Кампания активной зоны (на полной мощности), лет	10
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,6
Радиус активной зоны, м	0,6
Материал топлива	UN
Обогащение по U-235, %:	
внутренняя часть активной зоны, %	40
внешняя часть активной зоны, %	50

В качестве теплоносителя, охлаждающего активную зону реактора, используется жидкометаллический изотопически чистый ${}^7\text{Li}$. Топливные сборки в реакторе образуют единый блок, полностью заменяемый при перегрузках. Для обеспечения длительной безопасной и автономной эксплуатации в реакторе Rapid-L используется трехмодульная система управления, включающая модули ввода и вывода поглотителя нейтронов в реактор, а также модуль, обеспечивающий саморегулирование реактивности при изменении температуры. В качестве выгорающего поглотителя в данном реакторе используется жидкий ${}^6\text{Li}$ с обогащением по данному изотопу 95%.

Благодаря трехмодульной системе управления реактор может функционировать полностью в автономном режиме (без оператора) [14].

Проект реактора **U-Battery** [15] разрабатывался в университетах Манчестера (Великобритания) и Делфта (Нидерланды). Позднее для продвижения проекта был сформирован консорциум во главе с британской компанией URENCO.

U-Battery представляет собой высокотемпературный газоохлаждаемый реактор на тепловых нейтронах. Установка может быть использована как источник тепло- и электро-снабжения для крупных промышленных объектов, удаленных и труднодоступных районов, а также в качестве резервных источников энергии для крупных атомных станций. Основные характеристики реакторной установки приведены в табл. 6.

Таблица 6

Характеристики реактора U-Battery

Параметр	Значение
1	2
Мощность реактора (тепловая), МВт	10
Расчетный срок службы реактора, лет	60
Интервал между перегрузками, лет	5
Активная зона	
Высота активной зоны, м	0,32
Радиус активной зоны, м	0,108
Материал топлива	UO ₂
Обогащение по ${}^{235}\text{U}$, %	20

Окончание табл. 6

1	2
Отражатели	
Толщина радиального отражателя, мм	200
Толщина аксиального отражателя, мм	200
Материал радиального и аксиального отражателей	BeO
Толщина центрального отражателя, мм	250
Материал центрального отражателя	графит

В данном реакторе используются шаровые твэлы TRISO, теплосъем с которых осуществляется гелием в режиме естественной циркуляции. Органы СУЗ располагаются в центральном графитовом отражателе. Для компенсации запаса реактивности используются стержни с выгорающим поглотителем – карбидом бора.

Малогобаритный высокотемпературный реактор без первичного теплоносителя

Реакторные установки сверхмалой мощности относятся к малоизученной области использования ядерной энергии. В связи с этим представляет интерес разработка маломощного реактора по типу высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, но без контура первичного теплоносителя. В условиях отсутствия теплоносителя теплосъем с корпуса реактора осуществляется за счет теплопроводности и излучения системой поверхностного охлаждения без превышения максимально допустимой для топлива типа ТРИСО температуры (1600°C). Обеспечение достаточного теплосъема при номинальной мощности без принудительной циркуляции теплоносителя придает установке значительно более высокие свойства внутренней самозащищенности. В данном типе реактора полностью отсутствует возможность аварии с прекращением энергопитания, которая в случае своего возникновения в других типах реакторов приводит к наиболее тяжелым последствиям. Кроме того, большой запас по температуре топлива ($\approx 400^\circ\text{C}$), между рабочей и предельно допустимой температурами дает возможность обеспечить саморегулирование за счет температурного коэффициента реактивности. Использование данного температурного запаса позволяет введение более чем 3% отрицательной реактивности, что достаточно как для компенсации оперативного запаса реактивности на выгорание, так и прекращения ядерной реакции деления. В этом смысле реакторная установка аналогична «газовой колонке», в которой при отключении подачи охлаждающей воды (система поверхностного охлаждения) блокируется подача газа.

Для реализации данного проекта необходимо, в первую очередь, решить следующие задачи:

- определить максимально возможную тепловую мощность реактора;
- выбрать величину топливной загрузки, обогащение по основному делящемуся изотопу;
- рассчитать нейтронно-физические характеристики: распределение энерговыделения, кампанию реактора;
- рассмотреть возможности саморегулирования реактора, компенсации потери реактивности при выгорании топлива;
- оценить эффективность систем управления.

Данная установка в силу своих внутренне присущих свойств безопасности может быть использована в качестве источника электро- и теплоснабжения в труднодоступных и удаленных районах.

Заключение

В статье отмечены факторы, обуславливающие востребованность создания реакторов малой и сверхмалой мощности, рассмотрена область их возможного применения. Проведен обзор некоторых из существующих проектов маломощных реакторных установок, а также

приведены основные характеристики разрабатываемых реакторов и некоторые особенности их конструкции, отмечены характеристики безопасности.

Проекты маломощных реакторных установок охватывают почти все типы существующих реакторов: водо-водяные энергетические реакторы, реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, реакторы с жидкосолевым теплоносителем, высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы на быстрых и тепловых нейтронах. Подводя итоги данного обзора современных проектов реакторов сверхмалой мощности, необходимо отметить, что, несмотря на все разнообразие типов реакторов, основное внимание при проектировании данного типа установок уделяется:

- использованию пассивных систем безопасности;
- использованию систем отвода тепла на основе естественной циркуляции;
- снижению количества эксплуатирующего персонала;
- увеличению срока службы реактора и интервалов между перегрузками.

Цель дальнейших исследований – оптимизация нейтронно-физических характеристик малогабаритного высокотемпературного реактора без контура первичного теплоносителя. Данный тип реактора обладает высокими свойствами внутренней самозащищенности, кроме того, в нем исключена возможность возникновения аварии, связанной с обесточиванием установки.

Библиографический список

1. Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors [Electronic resource] / Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group of the World Nuclear Association // World Nuclear Association, 2015. – URL: http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/REPORT_Facilitating_Intl_Licensing_of_SMRs.pdf (accessed 10.11.2017)
2. От первой в мире АЭС к атомной энергетике XXI века: сб. тез. докл. X ежегодной конф. Обнинск: 28 июня-2 июля 1999. – Обнинск: Ядерное общество России, 1999.
3. Атомные электростанции сверхмалой мощности для прикладных и учебных целей: Российская конф. молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов: тез. докл. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ. 2016.
4. История атомной энергетике Советского Союза и России / под ред. В.А. Сидоренко. – М.: ИзДАТ, 2004. – Вып. 5.
5. Nuclear Development, Current Status, Technical Feasibility and Economics of Small Nuclear Reactors [Electronic resource] / Organisation of Economic Cooperation and Development (OECD) // Nuclear Energy Agency, 2011. – URL: <http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2011/current-status-small-reactors.pdf> (accessed 11.11.2017)
6. **Казанский, Ю.А.** Саморегулируемый реактор сверхмалой мощности для теплоснабжения «МАСТЕР ИАТЭ» / Ю.А. Казанский [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 63–71.
7. **Самохин, Д.С.** Быстрый свинцовый реактор малой мощности для учебных целей / Д.С. Самохин [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 3. – С. 135-143.
8. **Левченко, В.А.** Основные характеристики америциевого реактора для нейтронной терапии. Реактор «МАРС» / В.А. Левченко [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2003. – № 3. – С. 72–82.
9. **Левченко, В.А.** Выбор топливной композиции для специализированного медицинского реактора / В.А. Левченко, В.А. Баршевцев, Ю.А. Казанский // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 113–119.
10. **Драгунов, Ю.Г.** Транспортабельная ядерная энергоустановка ГРЭМ для производства энергии и тепла мощностью 1000 кВт (э) / Ю.Г. Драгунов [и др.] // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетике; под ред. акад. РАН А.А. Саркисова. – М.: Наука, 2011. – С. 267–271.
11. **Wallenius, J.** ELECTRA: A Lead Cooled Reactor for Training and Education / J. Wallenius, E. Sundantseteg, S. Borrot [et al.] // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants. – 2015. – №4. – P. 124–139.

12. **Kambe, M.** Super Safe Small Reactor RAPID-L Conceptual Design and R&D [Electronic resource] / M. Kambe, H. Tsunoda, K. Mishima [et al.] // Japan Atomic Energy Research Institute, 2003. – URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/002/37002589.pdf?r=1 (accessed 15.11.2017)
13. **Hadfield, P.** Mini nuclear reactor could power apartment blocks [Electronic resource] / P. Hadfield, M. Fitzpatrick // NewScientist, 2001. – URL: <https://www.newscientist.com/article/dn1186-mini-nuclear-reactor-could-power-apartment-blocks/> (accessed 15.11.2017)
14. **Kambe, M.** RAPID-L and RAPID Operator Free Fast Reactor Concepts without Any Control Rods [Electronic resource] / M. Kambe, H. Tsunoda, K. Mishima [et al.] // Proc. of the Int. Conf. on Global Environment and Advanced Nuclear Power Plants (GENES4/ANP2003). – Kyoto, Japan, 2003. – P. 1039. – URL: <https://www.uxc.com/smr/Library/Design%20Specification/RAPID/Papers/2003%20-%20RAPID-L%20and%20RAPID%20Operator%20Free%20Fast%20Reactor%20Concepts%20Without%20Any%20Control%20Rods.pdf> (accessed 15.11.2017)
15. **Ding, M.** Design of a U-Battery [Electronic resource] / M. Ding [et al.] // TU-Delft, Manchester University, 2011. – URL: http://www.janleenkloosterman.nl/reports/ubattery_final_201111.pdf (accessed 17.11.2017)

*Дата поступления
в редакцию 31.01.2018*

A.V. Kainova, Yu.P. Sukharev, G.N. Vlasichev

SUPER LOW POWER NUCLEAR REACTORS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alekseev

Purpose: This article aims to analyse the major trends in design of Low Power Nuclear Reactors.

Methodology: The main investigation method is the analysis of the accessible sources of information related to the scope of the study: articles, conferences proceedings, reports.

Results: Some of existing projects of Super Low Power Nuclear Reactors, both Russian and foreign, are reviewed. The main developed characteristics of Low Power Reactors and its design features are given, as well as these reactors field of application and safety performance. The aim of the further development is defined and the objectives of the study needed to achieve this aim are noticed.

Key words: Low and Super Low Power Nuclear Reactors, Pressurized Water Reactors, Fast Neutron Reactors, High Temperature Gas-Cooled Reactors, Molten Salt Reactors.