Попов Алексей Германович
магистрант
Институт международных отношений Национального исследовательского ядерного университета МИФИ
г. Москва, Россия

Малые модульные реакторы – спасение для развивающихся стран?

Аннотация. В данной статье рассматривается возможное применение новых малых модульных реакторов для стран с развивающейся экономикой, особенно стран БРИКС. Малые модульные реакторы ожидаются дешевыми в массовом производстве, однако развитие данного типа реакторов может представлять трудности. Автор статьи рассматривает возможные варианты, как ММР может помочь в развитии атомного сектора, а также возможные проблемы и перспективы.

Ключевые слова: малый модульный реактор, развивающиеся страны, экономика, развитые страны.

Popov Alexey Germanovich
master's student
Institute of International Relations of the National Research Nuclear University MEPhI
Moscow, Russia

Small modular reactors – a salvation for developing countries?

Abstract. This article discusses the potential applications of new small modular reactors for emerging economies, especially the BRICS countries. Small modular reactors are expected to be cheap to mass produce, but the development of this type of reactor may be challenging. The author of the article discusses possible ways in which SMRs can help develop the nuclear sector, as well as possible challenges and prospects.

Key words: small modular reactor, developing countries, economy, developed countries.

На сегодняшний день, когда глобальный спрос на чистую, надежную и устойчивую энергию продолжает расти, малые модульные реакторы (ММР) стали многообещающей инновацией в области ядерной энергетики. В отличие от традиционных крупных ядерных реакторов ММР представляют собой компактные, изготовленные на заводе системы, которые обеспечивают большую гибкость в развертывании, более низкие первоначальные затраты и улучшенные функции безопасности. Их потенциал поддержки целей декарбонизации при решении проблем энергетической безопасности привлек все большее внимание правительств, исследователей и заинтересованных сторон отрасли по всему миру.

Некоторые эксперты считают, что подобная модель реакторов поможет развитию атомной энергетики в странах с развивающейся экономикой. Учитывая потенциальные дешевизну и простоту в строительстве и установке, такое решение может быть одним из самых эффективных для подобных стран. Однако помогут ли ММР этим странам, и нужны ли они вообще?

Для начала нужно разобраться какие страны с развивающейся экономикой строят АЭС. Мы берем в расчет любые модели АЭС, так как это показывает, какие страны интересуются развитием своего атомного сектора, к тому же на данной момент существуют всего два ММР (в России и Китае).

Также мы сопоставим каждую из стран в таблице с процентом, который занимает атомная энергетика относительно других источников энергии. В некоторых случаях будет указан ноль, так как у данных стран пока нет АЭС

По данным World Nuclear Association и Международного Энергетического Агентства получаем, что всего девять развивающихся стран строят АЭС[1][2].

Таблица 1

Строящиеся реакторы в странах с развивающейся экономикой и сравнения выработки атомной энергии с другими источниками

Страна	Количество строящихся реакторов	Процент выработки атомной энергии относительно других источников
Аргентина	1	2,9%
Бангладеш	2	0%
Бразилия	1	1%
Египет	4	0%
Индия	6	1,8%
Иран	1	0,5%
Китай	31	3,5%
Пакистан	1	10,1%
Турция	4	0%

На данный момент из всех развивающихся стран только Китай активно строит АЭС, но даже такой высокий темп строительства складывается в 3,5% от общего производства энергии. Если мы берем во внимание страны, строящие свои первые АЭС (Бангладеш, Египет, Турция), то 2-4 реактора не смогут серьезно повлиять на производство энергии в этих странах и дальнейшему развитию атомного сектора в этих странах.

С одной стороны, такое состояние как раз отлично подходит для ММР. Эксперты считают, что ММР могут решить следующие проблемы:

- Более низкие затраты и финансовая доступность.
  - Сокращение начального капитала: ММР требуют меньших первоначальных инвестиций по сравнению с традиционными реакторами, что делает финансирование осуществимым для стран с ограниченным бюджетом.
  - Масштабируемость: модульные конструкции позволяют постепенно наращивать мощности, согласовываясь с растущим спросом на энергию и избегая чрезмерных инвестиций.
- Более быстрое развертывание и гибкость.
  - Время строительства: ММР могут быть развернуты за 3–5 лет по сравнению с 10+ годами для крупных реакторов, ускоряя доступ к энергии.
  - Гибкость размещения: подходит для отдаленных районов или регионов с недостаточно развитыми сетями, обходя ограничения инфраструктуры.
- Повышенная безопасность и простота.
  - Пассивные системы безопасности: внутренние функции безопасности (например, самоохлаждение) снижают зависимость от внешнего питания или вмешательства человека, что критически важно для регионов с ограниченным техническим опытом.
  - Меньший радиоактивный инвентарь: более низкий риск серьезных аварий и упрощенное планирование действий в чрезвычайных ситуациях.
- Экономическое и социальное воздействие.
  - Создание рабочих мест: возможности трудоустройства на местном уровне в строительстве, эксплуатации и обслуживании.
  - Энергетическая безопасность: снижает зависимость от импортируемого ископаемого топлива, стабилизирует цены на энергоносители и поддерживает промышленный рост.

- Климат и устойчивость.
  - Низкоуглеродная энергия: поддерживает цели декарбонизации, обеспечивая надежную базовую мощность, дополняя прерывистые возобновляемые источники энергии.
  - Неэлектрические применения: потенциал для опреснения, производства водорода и централизованного теплоснабжения, удовлетворяя более широкие потребности в развитии.

Принимая во внимание эти аргументы стоит отметить, что все они валидны только при условии, что ММР будут иметь успех и будут распространяться с большей эффективностью, чем реакторы предыдущего поколения. На сегодняшний день только две страны имеют ММР (Россия и Китай), и если рассматривать страны, которые разрабатывают свои ММР (данные World Nuclear Association), то можно увидеть, что все эти страны с развитой экономикой[1].

Таблица 2

Строящиеся малые модульные реакторы

Модель	**Тип**	**Мощность, МВт**	**Компания, Страна**	**Статус**
NuScale VOYGR	PWR	77	NuScale Power, США	Лицензирован, запланировано первое развертывание
BWRX-300	BWR	300	GE Hitachi, США	Перспективные разработки, проекты в Канаде и Польше
SMR-160	PWR	160	Holtec, США/Канада	В процессе лицензирования
SMART	PWR	100	KAERI, Южная Корея	Создан прототип, планы экспорта
AP300	PWR	300	Westinghouse, США	Анонсирован, развертывание запланировано на конец 2020-х годов
PWR-20	PWR	20	Last Energy, США	Модульный, с воздушным охлаждением, быстрого развертывания
RITM-200M/N	PWR	50-55	ОКБМ им. Африкантова, Россия	Используется в ледоколах, наземных проектах.
BANDI-60S	PWR	60	Kepco, Южная Корея	Новый дизайн
CNSP	Гибрид PWR и солнечных батарей	300	Holtec, США	Гибридное приложение
PRISM	РБН на натрии	311	GE Hitachi, США	Продвинутый прототип
Natrium	РБН на натрии	345	TerraPower/GE Hitachi, США	Демонстрационный проект в Вайоминге, США
ARC-100	РБН на натрии	100	ARC/GE Hitachi, США	Продвинутая разработка
Gen4 Module	РБН на свинце-висмуте	25	Gen4 Energy, США	Ранняя стадия
Sealer	РБН на свинец	3-10	LeadCold, Швеция	Ранняя стадия
eVinci	РБН с	0,2-5	Westinghouse,	Микрореактор,

	тепловой трубкой		США	продвинутая стадия
Aurora	РБН с тепловой трубкой	1,5	Oklo, США	Микрореактор, фаза лицензирования
Integral MSR	MSR	192	Terrestrial Energy, Канада	Продвинутая разработка
Seaborg CMSR	MSR	100	Seaborg, Дания	Морские и наземные планы
Moltex SSR-W	MSR	300	Moltex, Великобритания	Продвинутая разработка
Hermes	MSR	35	Kairos, США	Прототип
Xe-100	HTR	80	X-energy, США	Продвинутая разработка
U-battery	HTR	4	Urenco, Великобритания	Микрореактор, ранняя стадия
Starcore	HTR	10-20	Starcore, Канада	Микрореактор, ранняя стадия
MMR-5/-10	HTR	5/10	UltraSafe Nuclear, США	Микрореактор, продвинутая стадия
BANR	HTR	50	BWXT, США	Микрореактор, ранняя стадия

Это ожидаемо, так как у всех стран, перечисленных в этой таблице, уже имеется большой опыт в строительстве АЭС, а также обладают развитой инфраструктурой и органы по ядерному регулированию. Отсюда вытекает проблема строительства и размещения ММР в странах с развивающейся экономикой – отсутствие инфраструктуры. Соответственно эти страны (за исключением Китая) будут вынуждены снова зависеть от стран Запада, Кореи или России в развитии своего атомного сектора, что будет противоречить идей поддержки ММР, как путь самостоятельного развития развивающихся стран.

К тому же, из таблицы 1 видно, что атомный сектор этих стран не превышает 10%, и что дальнейшее продвижение этого сектора будет зависеть от внутренней политики каждой страны по отдельности.

Суммируя вышеуказанные тезисы, можно подвести главные проблемы ММР для развивающихся стран:

- Ограничения инфраструктуры и цепочки поставок.
  - Совместимость сетей: небольшие сети в развивающихся странах могут испытывать трудности с интеграцией ММР без рисков для стабильности. Модульная масштабируемость помогает, но часто требуется модернизация сетей.
  - Ограничения поставок топлива: для некоторых ММР требуется высокопробный низкообогащенный уран (HALEU), который не является широкодоступным. Развивающиеся страны могут зависеть от иностранных поставщиков, что вызывает опасения по поводу безопасности и стоимости.
  - Промышленные мощности: ограниченные местные производственные и технические знания затрудняют производство и обслуживание модулей, увеличивая зависимость от международных цепочек поставок.
- Проблемы регулирования и лицензирования
  - Отсутствие рамок: во многих развивающихся странах отсутствуют органы ядерного регулирования или специальные процессы лицензирования для ММР. Гармонизация международных стандартов имеет решающее значение, но требует много времени.
  - Задержки лицензирования: новые конструкции ММР (например, реакторы на расплавленной соли, быстрые реакторы) требуют обширных проверок безопасности,

для эффективного проведения которых у регулирующих органов в развивающихся странах может не хватить опыта.

- Политические и социальные препятствия
  - Общественное противодействие: сохраняются заблуждения относительно ядерной безопасности и отходов, особенно в регионах без предварительного опыта в ядерной сфере. Участие общественности необходимо, но требует больших ресурсов.
  - Нестабильность политики: требуется долгосрочная приверженность правительства, но смена политических приоритетов или коррупция могут сорвать проекты.
- Потребности в международном сотрудничестве
  - Передача технологий: развивающимся странам требуется поддержка нормативно-правовой базы, инфраструктуры и обучения. Такие инициативы, как Форум регуляторов ММР МАГАТЭ, направлены на устранение пробелов, но прогресс идет медленно.
  - Модели финансирования: инновационные подходы (например, Build-Own-Operate-Decommission, BOOD) обсуждаются, но не опробованы в большинстве развивающихся стран.
- Финансовые барьеры
  - Высокие первоначальные затраты: хотя первоначальные затраты на ММР ниже, чем на традиционные реакторы, их удельные затраты остаются высокими из-за отсутствия экономии масштаба и рисков «первого в своем роде» (FOAK). Развивающиеся страны часто не имеют доступа к доступным механизмам финансирования ядерных проектов.
  - Неопределенная окупаемость инвестиций: частные инвесторы колеблются из-за длительных сроков окупаемости и неясной политической поддержки. Государственно-частное партнерство или государственные гарантии часто необходимы, но могут быть политически сложными.
- Технические и эксплуатационные проблемы
  - Управление отработанным топливом: развивающиеся страны часто не имеют планов долгосрочного хранения ядерных отходов, что является критической проблемой для развертывания ММР.
  - Нехватка рабочей силы: эксплуатация ММР требует специальных навыков, что может потребовать привлечения иностранных экспертов или дорогостоящих программ обучения.

Учитывая подобные выводы, осуществимость малых модульных реакторов в контексте развивающихся стран остается весьма сомнительной. Одним из основных барьеров является отсутствие инфраструктуры. Во многих развивающихся странах отсутствуют технические знания, цепочки поставок и регулирующие органы, необходимые для безопасного и эффективного управления ядерными технологиями, что еще больше усложняет развертывание ММР. Кроме того, несмотря на их меньший размер и модульную конструкцию, первоначальные капиталовложения, нормативная база и требования к инфраструктуре для ММР все еще могут быть непомерно дорогими для стран с ограниченными финансовыми ресурсами и более слабыми институциональными рамками.

Более того, такие проблемы, как политическая нестабильность, недоверие общественности к ядерной энергетике и отсутствие надежной правовой базы для ядерной ответственности и управления отходами, затрудняют долгосрочное внедрение. Хотя ММР предлагают теоретические преимущества, такие как масштабируемость и повышенная безопасность, эти преимущества часто перевешиваются практическими трудностями внедрения в условиях ограниченных ресурсов.

Однако, возможно, есть проблеск надежды в совместных усилиях, возглавляемых странами БРИКС (Бразилия, Россия, Индия, Китай и Южная Африка). Эти страны,

включающие как ядерные, так и развивающиеся экономики, активно работают над совместными платформами ядерной энергетики[3]. Такие альянсы могли бы обеспечить общие технические ресурсы, модели финансирования и стандартизированные системы регулирования, которые сделают технологию ММР более доступной для развивающихся стран в пределах их сфер влияния. В случае успеха ядерная инициатива БРИКС могла бы заложить основу для более справедливого и реалистичного пути к принятию ядерной энергетики.

Список источников

1. World Nuclear Association. (25 Март 2025 г.). Plans For New Reactors Worldwide. Получено из World Nuclear Association: https://world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/plans-for-new-reactors-worldwide
2. Международное Энергетическое Агентство. (б.д.). Countries & Regions. Получено из IEA: https://www.iea.org/countries
3. РИА Новости. (19 Октябрь 2024 г.). БРИКС готовится стать драйвером развития мирового мирного атома. Получено из РИА Новости: https://ria.ru/20241019/briks-1978850475.html