

УДК 621.039.532

**ТЕПЛОНОСИТЕЛИ В ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ: СРАВНИТЕЛЬ-
НЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ И ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТИ И ЭКО-
НОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ**

Ямалов Б.Р., студент гр А-1-23, II курс

Научный руководитель: Базин Д.А., ассистент

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

Теплоносители играют ключевую роль в ядерных реакторах, обеспечивая эффективный отвод тепла от активной зоны и передачу его в системы генерации энергии. Основные требования к теплоносителям включают высокую теплоемкость и теплопроводность, химическую стабильность, радиационную стойкость, низкую коррозионную активность, а также безопасность и экологичность. Эти параметры напрямую влияют на эффективность, надежность и долговечность работы реактора. Кроме того, теплоноситель должен быть совместим с материалами конструкции реактора, чтобы минимизировать износ и продлить срок службы оборудования. В настоящее время в ядерной энергетике используются как традиционные, так и инновационные теплоносители, каждый из которых обладает уникальными свойствами и ограничениями. Традиционные теплоносители, такие как вода, жидкие металлы и газы, уже давно применяются в ядерной энергетике благодаря их проверенным эксплуатационным характеристикам. Однако их использование связано с рядом технических и экономических ограничений, что стимулирует поиск новых решений. Инновационные теплоносители, такие как расплавленные соли, нанофлюиды и сверхкритические жидкости, предлагают новые возможности для повышения эффективности и безопасности ядерных реакторов, но их внедрение требует решения сложных технических задач и значительных инвестиций. В данной работе представлен сравнительный анализ традиционных и инновационных теплоносителей, их преимуществ, недостатков и экономических аспектов использования. Этот анализ позволит оценить перспективы применения различных типов теплоносителей в ядерной энергетике, а также определить направления для дальнейших исследований и разработок.

Вода, являясь одним из наиболее распространенных теплоносителей, широко применяется в легководных и тяжеловодных реакторах. Легкая вода (H_2O) используется в реакторах с водой под давлением PWR (Pressurized Water Reactor) и кипящих реакторах BWR (Boiling Water Reactor), где она выполняет функции как теплоносителя, так и замедлителя нейтронов. Ее преимущества заключаются в высокой теплоемкости, доступности и низкой стоимости. Однако легкая вода имеет ограниченный температурный диапазон, что требует поддержания высокого давления для предотвращения закипания, а также

склонна к радиолизу, что может привести к выделению водорода и созданию взрывоопасных условий. Тяжелая вода (D_2O), используемая в реакторах типа CANDU (CANadian Deuterium Uranium reactor), обладает меньшим сечением поглощения нейтронов, что позволяет использовать природный уран без обогащения [1]. Несмотря на свои преимущества, тяжелая вода значительно дороже легкой, что ограничивает ее широкое применение.

Жидкие металлы, такие как натрий, свинец и их сплавы, нашли применение в реакторах на быстрых нейтронах (БН), где они обеспечивают высокую теплопроводность и способность работать при повышенных температурах без значительного давления. Натрий, благодаря своей низкой температуре плавления ($98\text{ }^{\circ}\text{C}$) и высокой теплопроводности, является наиболее распространенным жидкометаллическим теплоносителем. Он используется в реакторах типа БН-600 и БН-800, где обеспечивает эффективный теплоотвод и высокий КПД [2]. Однако натрий химически активен и может реагировать с водой и воздухом, что требует сложных систем изоляции и контроля, что увеличивает стоимость эксплуатации. Несмотря на эти сложности, натрий остается ключевым теплоносителем для быстрых реакторов благодаря своей способности эффективно отводить тепло и работать при высоких температурах без значительного давления. Свинец и свинец-висмутовые сплавы, обладающие высокой плотностью и способностью к естественной циркуляции, рассматриваются как перспективные теплоносители для реакторов нового поколения. Они обеспечивают высокий уровень безопасности благодаря своим физическим свойствам, но вызывают коррозию конструкционных материалов при высоких температурах, что требует использования специальных сплавов и покрытий.

Газовые теплоносители, такие как гелий и углекислый газ, используются в высокотемпературных реакторах HTR (High-Temperature Reactor) и газоохлаждаемых реакторах. Гелий, будучи инертным газом, идеально подходит для высокотемпературных реакторов, где он обеспечивает стабильную работу при температурах до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако его низкая плотность и высокая стоимость ограничивают широкое применение. Углекислый газ, используемый в реакторах Magnox (Magnox reactor) и AGR (Advanced Gas-cooled Reactor), дешевле гелия, но требует более сложных систем для поддержания давления и может вызывать коррозию при определенных условиях. Несмотря на эти ограничения, газовые теплоносители открывают перспективы для реакторов нового поколения, таких как высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы VHTR (Very High-Temperature Reactor), где их свойства могут быть максимально использованы [3].

Помимо традиционных теплоносителей, в современных ядерных технологиях активно исследуются и внедряются инновационные решения, которые позволяют преодолеть ограничения существующих систем.

Расплавленные соли представляют собой смеси неорганических солей, которые находятся в жидком состоянии при высоких температурах. Наиболее распространенные составы включают фториды лития, бериллия и циркония [4]. Эти теплоносители обладают рядом уникальных свойств, таких как

высокая теплоемкость и теплопроводность, низкое давление паров даже при высоких температурах, что снижает риск разгерметизации, а также химическая стабильность и радиационная стойкость. Важным преимуществом расплавленных солей является их способность растворять ядерное топливо, что делает их пригодными для использования в реакторах на расплавах солей MSR (Molten Salt Reactor). Реакторы на расплавах солей являются одним из наиболее перспективных типов реакторов четвертого поколения. В таких реакторах расплавленные соли выполняют одновременно функции теплоносителя и топливной среды. Это позволяет упростить конструкцию реактора за счет отсутствия твердых топливных элементов, обеспечить непрерывную переработку топлива и удаление продуктов деления, а также повысить безопасность за счет пассивных систем охлаждения и низкого давления в контуре. Однако существуют и серьезные вызовы, такие как коррозия конструкционных материалов и необходимость разработки новых сплавов, устойчивых к воздействию расплавленных солей.

Жидкометаллические теплоносители, такие как натрий-калий и свинец-литий, активно исследуются для использования в реакторах нового поколения. Их основные преимущества включают высокую теплопроводность и теплоемкость, низкое давление паров при рабочих температурах, а также способность работать в широком диапазоне температур. Например, свинец-висмутовые сплавы обладают высокой плотностью и низкой химической активностью с водой, что делает их привлекательными для быстрых реакторов. Жидкие металлы особенно перспективны для быстрых реакторов, где они обеспечивают эффективное охлаждение и высокий коэффициент воспроизводства топлива. Однако их использование связано с рядом проблем, таких как коррозия конструкционных материалов, высокая плотность и вязкость, что усложняет циркуляцию, а также необходимость защиты от контакта с воздухом и водой.

Нанофлюиды представляют собой традиционные теплоносители (вода, масла, расплавленные соли) с добавлением наночастиц (оксиды металлов, углеродные нанотрубки, графен). Добавление наночастиц позволяет значительно улучшить теплофизические свойства, такие как увеличение теплопроводности на 10-30%, повышение теплоемкости и стабильности при высоких температурах [5]. Несмотря на перспективность, нанофлюиды сталкиваются с рядом вызовов. Агрегация и осаждение наночастиц снижает эффективность теплоносителя, а влияние радиации на стабильность наночастиц и их взаимодействие с окружающей средой требует дальнейших исследований. Кроме того, высокая стоимость производства и обработки нанофлюидов ограничивает их широкое применение.

Сверхкритические жидкости (например, сверхкритическая вода или углекислый газ) находятся в состоянии, где исчезает граница между жидкостью и газом. Это позволяет достичь уникальных свойств, таких как высокая плотность и теплоемкость, близкая к жидкости, низкая вязкость, как у газа, что облегчает циркуляцию, а также возможность работы при экстремально высоких температурах (до 700°C и выше) [6]. Сверхкритическая вода рассматривается

как теплоноситель для реакторов нового поколения, таких как сверхкритические водяные реакторы. Эти реакторы сочетают преимущества легководных и быстрых реакторов, обеспечивая высокий КПД и компактность. Однако использование сверхкритических жидкостей требует решения проблем, связанных с коррозией и эрозией материалов, а также разработки новых сплавов, устойчивых к экстремальным условиям.

Для систематизации и наглядного сравнения ключевых характеристик, преимуществ и недостатков различных типов теплоносителей, ниже представлена таблица, в которой рассмотрены их основные параметры, включая теплофизические свойства, химическую стабильность, радиационную стойкость, коррозионную активность, а также экономические аспекты использования.

Таблица 1. Сравнительный анализ традиционных и инновационных теплоносителей: преимущества, недостатки и экономические аспекты.

Тип теплоносителя	Преимущества	Недостатки	Экономические аспекты
Традиционные теплоносители			
Вода (H ₂ O и D ₂ O)	Высокая теплоемкость, доступность, низкая стоимость (для легкой воды), возможность использования в качестве замедлителя нейтронов.	Ограниченный температурный диапазон, склонность к радиолизу (для легкой воды), высокая стоимость (для тяжелой воды).	Легкая вода — наиболее экономичный вариант. Тяжелая вода значительно дороже, что ограничивает ее применение.
Жидкие металлы (натрий, свинец)	Высокая теплопроводность, способность работать при высоких температурах без значительного давления, естественная циркуляция (для свинца).	Химическая активность (натрий), коррозия конструкционных материалов, высокая плотность и вязкость.	Натрий относительно дешев, но требует сложных систем изоляции и контроля. Свинец и его сплавы дороже, но обеспечивают более высокий уровень безопасности.
Газовые теплоносители (гелий, углекислый газ)	Высокая радиационная стойкость, возможность работы при экстремально высоких температурах (гелий).	Низкая плотность (гелий), высокая стоимость, сложность поддержания давления.	Гелий более дорогостоящий, что ограничивает его применение. Углекислый газ дешевле, но требует сложных систем для поддержания необходимого давления.

Продолжение таблицы 1

Инновационные теплоносители			
Расплавленные соли	Высокая теплоемкость и теплопроводность, низкое давление паров, химическая стабильность, возможность растворения ядерного топлива.	Коррозия конструкционных материалов, необходимость разработки новых сплавов.	Высокая стоимость разработки и внедрения из-за необходимости создания новых материалов, устойчивых к коррозии.
Нанофлюиды	Увеличение теплопроводности на 10-30%, повышение теплоемкости и стабильности при высоких температурах.	Агрегация и осаждение наночастиц, высокая стоимость производства.	Высокая стоимость производства и обработки, что делает их менее экономически выгодными на текущем этапе.
Сверхкритические жидкости (сверхкритическая вода, углекислый газ)	Высокая плотность и теплоемкость, низкая вязкость, возможность работы при экстремально высоких температурах.	Коррозия и эрозия материалов, необходимость разработки новых сплавов.	Высокие затраты на разработку и внедрение, связанные с необходимостью создания материалов, устойчивых к экстремальным условиям.

Теплоносители являются важнейшим элементом ядерных реакторов, определяющим их эффективность, безопасность и экономическую целесообразность. Традиционные теплоносители остаются основой ядерной энергетики благодаря их проверенным эксплуатационным характеристикам. Однако их ограничения, такие как коррозия, радиоллиз и высокая стоимость, стимулируют поиск новых решений. Инновационные теплоносители предлагают новые возможности для повышения эффективности и безопасности ядерных реакторов. Они обладают уникальными свойствами, такими как высокая теплоемкость, теплопроводность и радиационная стойкость, но их широкое применение требует решения технических и экономических вызовов, таких как коррозия материалов, высокая стоимость производства и необходимость разработки новых технологий. Внедрение инновационных теплоносителей может значительно повысить эффективность и безопасность ядерных реакторов, но для этого необходимы дальнейшие исследования и инвестиции. Таким образом, выбор оптимального теплоносителя остается одной из ключевых задач современной ядерной энергетики, требующей комплексного подхода и учета всех технических, экономических и экологических аспектов. Учитывая растущие требования к безопасности, эффективности и экологичности ядерных реакторов, выбор

оптимального теплоносителя становится ключевым фактором для успешного развития атомной энергетики в будущем

Список литературы

1. Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. Introduction to Nuclear Engineering (3rd ed.). Prentice Hall, 2001.
2. Субботин В.И., Арнольдов М.Н., Козлов Ф.А., Шимкевич А.Л. Жидкометаллические теплоносители для ядерной энергетики // Атомная энергия. — 2002. — Т. 92, № 1. — С. 31–42.
3. Ананьев Е. П., Кружилин Г. Н. Роль газа как теплоносителя в развитии атомных электростанций // Атомная энергия. — 1976. — Т. 40, № 1. — С. 3–11.
4. Блинкин В. Л. Жидкосолевые ядерные реакторы. — М. : Атомиздат, 1978. — 111 с.
5. Das, Sarit K., Choi, Stephen U. S., Yu, Wenhua. Nanofluids: Science and Technology. — Hoboken: Wiley-Interscience, 2007. — 397 p.
6. Назарова В. В., Масленников Г. Е., Фоменко А. А., Рыжков А. Ф. Особенности сверхкритического CO₂ как теплоносителя в энергетических циклах // Даниловские чтения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. — Екатеринбург: УрФУ, 2019. — С. 834–837.