

Применение ядерного тепла: международный обзор

Ю. Купитц и М. Подест

Ядерная энергия играет важную роль в безопасном и надежном производстве электроэнергии и обладает значительным потенциалом для увеличения общего энергетического запаса, необходимого для будущего.

Основная часть мировых запасов первичной энергии в настоящее время расходуется в виде тепла в различных отраслях промышленности и для обогрева жилищ. В промышленно развитых странах около 70 % первичной энергии расходуется в виде тепла и только 30 % — в виде электричества.

Ядерные реакторы могут производить тепло и обеспечить необходимую замену ископаемому топливу, в отношении которого в перспективе будут иметь место дефицит, возрастание цен и невозможность использования в течение длительного времени.

В общем, потребление тепла можно представить в виде двух температурных уровней:

- Низкотемпературное тепло в виде горячей воды или пара с низкими параметрами для коммунального теплоснабжения, опреснения и других целей.
- Тепло для высокотемпературных процессов, которые включают паровые процессы различных отраслей промышленности (производство алюминия, химическая промышленность) или высокотемпературное тепло для переработки ископаемых видов топлива, производства водорода и так далее.

Различные типы реакторов могут обеспечивать эти температурные уровни. Охлаждаемые водой реакторы (легководные и тяжеловодные) могут производить горячую воду или пар с температурой до 300 °С. Газоохлаждаемые реакторы, в которых теплоносителями служат гелий или двуокись углерода, могут вырабатывать пар для технологических процессов до 540 °С, а высокотемпературный газоохлаждаемый реактор с графитовым замедлителем (HTGR) — до 950 °С*.

Ю. Купитц и М. Подест — сотрудники Отдела ядерной энергетики Агентства.

* См. сборник трудов заседания Технического комитета и рабочей группы по применению ядерного тепла, Краков, 5–9 декабря 1983 г., который был опубликован МАГАТЭ в сентябре 1984 г. для подробного описания уровня развития на данном этапе тепловых процессов и применения в них тепла ядерных реакторов.

Использование низкотемпературного тепла

Практика показала, что низкотемпературное ядерное теплоснабжение является технически осуществимым и его коммерческое использование может быть обеспечено энергетическими реакторами с одновременной выработкой электричества и пара (АТЭЦ) или специализированными низкотемпературными станциями ядерного теплоснабжения.

Экономические исследования по использованию тепла от легководных реакторов (LWR) показали, что атомные электростанции, в принципе, пригодны для производства низкотемпературного тепла для коммунального теплоснабжения и промышленных процессов. Однако в целях безопасности эти атомные электростанции размещаются на соответствующем расстоянии от населенных районов, что приводит к увеличению затрат на распределение по потребителям.

В Чехословакии и Финляндии отвод тепла для районного теплоснабжения от атомных электростанций (действующих, сооружаемых или запланированных), оборудованных советскими реакторами с водой под давлением (PWR) типа ВВЭР-440 или ВВЭР-1000, разрабатывается весьма тщательно. Планы по использованию тепла, отводимого от реактора PWR, прорабатываются в ГДР, Венгрии и Югославии. Хорошие результаты с отбором тепла для районного теплоснабжения достигнуты в СССР на Билибинской АТЭЦ, которая эксплуатируется около 10 лет.

Размещение атомных электростанций на большом расстоянии от населенных центров, обусловленное требованиями безопасности, отрицательно сказывается на экономической эффективности теплоснабжения. Некоторые проекты показывают, что расстояния передачи тепла длиной 30–40 километров являются вполне удовлетворительными. Исключением является результат выполненного применительно к Финляндии исследования о возможности подачи тепла от будущей АЭС Ловиза с реактором ВВЭР-1000, которая будет иметь 80-километровую линию передачи. Все же оказалось, что этот вариант является конкурентоспособным по отношению к альтернативным тепловым станциям на угле.

Атомные станции теплоснабжения

Другим подходом к снабжению ядерным теплом — особенно для коммунального теплоснабже-

ния — является использование специализированных атомных станций теплоснабжения. С точки зрения экономики и эффективности необходимо располагать эти ядерные установки как можно ближе к населенным районам, принимая все возможные меры безопасности. Наиболее интересны для такого применения так называемые системы внутренней безопасности реактора. Основной целью проектов, посвященных этому вопросу, является исключение технической возможности расплавления активной зоны при любых условиях эксплуатации реактора.

На основе этих принципов в СССР были разработаны и сооружаются в Горьком и Воронеже атомные станции теплоснабжения АСТ-500. Эти установки достаточно крупные и соответствуют потребностям в тепле некоторых районов СССР. Советские исследования, связанные с оценкой потребностей в тепле для экономики СССР в целом, привели к заключению, что 600 атомных станций теплоснабжения, мощностью 1000 МВт каждая, могут удовлетворить эти потребности. Приблизительно к 1995 г. планируется использование атомных станций теплоснабжения АСТ-300 (по аналогии с советскими АСТ-500) для обеспечения коммунальным теплом двух городов Чехословакии.

В результате исследований, проведенных в Швеции фирмой Asea-Atom, создан проект надежного реактора, работающего при низкой удельной мощности, температуре и давлении. Важными характеристиками реактора являются его безопасный останов и надежное охлаждение активной зоны. Принцип сохранения этих характеристик определяется как принцип PIUS (безусловная внутренняя безопасность).

Для уменьшения зависимости от ископаемого топлива разрабатываются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR), вырабатывающие электроэнергию и технологическое тепло с температурой до 950 °C и использующие мелкие уран-ториевые микровзлы, такие как представленные на фотографии. (Фото любезно предоставлено фирмой GA Technologies, Inc.)



В настоящее время во Франции исследуются возможности реактора CAS-300 (PWR) для теплоснабжения, хотя решения о практическом применении до сих пор не приняты.

Канадское акционерное общество по атомной энергии (AECL) на основе проекта предыдущего исследовательского реактора Слоупок-2 разработало небольшой ядерный реактор Слоупок-3 бассейнового типа (мощностью от 2 до 20 МВт тепловых) для обогрева зданий. Шесть реакторов Слоупок-2 были смонтированы в городах Канады и разрешена их эксплуатация в автоматическом саморегулируемом режиме с дистанционным контролем. Сочетание использования низкотемпературного тепла и технических решений, обеспечивающих простоту, безопасность, низкую стоимость и малые размеры установки, облегчает приспособляемость к большому рынку, имеющему разброс как в тепловых, так и в пространственных параметрах.

Типичным примером использования ядерного тепла для промышленных процессов является Канадская Брюс Балк Стим Систем. В течение более 10 лет пар со средними параметрами по давлению от реакторов Канду поставлялся соседнему заводу для производства тяжелой воды. К 1988 г. на этом участке будут эксплуатироваться 8 энергетических реакторов Канду электрической мощностью 800 МВт каждый плюс дополнительные 13 % от полного значения выходной тепловой мощности для парового процесса.

В Федеративной Республике Германии АЭС Штад оф Нордвестдойч Крафтверк АГ с конца 1963 г. обеспечила поставку пара 60 т/ч при давлении 8 бар и температуре 270 °C. Около 95 % пара, транспортируемого по трубопроводу длиной около



1,5 км, возвращается обратно в виде конденсата. Экономические показатели такой поставки пара выше, чем для процесса, использующего тяжелую нефть.

Уникальным примером использования быстрого реактора для одновременного производства электроэнергии и опреснения является реактор БН-350, расположенный в г. Шевченко, СССР. Электрическая мощность этого реактора 120 МВт, тогда как основная часть реакторного тепла извлекается из третьего контура и используется на станции опреснения морской воды, имеющей производительность 50 000 м³ пресной воды в сутки.

Использование высокотемпературного тепла

Использование высокотемпературного ядерного тепла может быть осуществлено двумя существенно разными способами: использование пара с температурой до 540 °С и непосредственное использование тепла, переданного через теплообменник при температуре до 950 °С.

Применение паровых процессов. Газоохлаждаемые реакторы с температурой теплоносителя в первом контуре от 650 (AGR) до 750 °С (HTGR) или выше могут производить пар, сравнимый с паром, получаемым при сжигании органического топлива с температурой 540 °С при давлении 180 бар. Этот пар с высокими параметрами удобен для удовлетворения нужд ряда промышленных и химических комплексов. Потенциальные области промышленного применения ядерных паровых процессов:

- Производство алюминия
- Выплавка стали
- Химическая промышленность
- Добыча нефти
- Добыча нефти из сланцев
- Добыча нефти из битуминозных песков
- Газификация угля посредством газификационных процессов Лурги и Эксона.

По имеющейся в настоящее время технологии паровые процессы обеспечиваются посредством сжигания органических топлив. Большинство этих энергоемких процессов требует значительное количество пара и электроэнергии, делая их совместную выработку экономически выгодным решением.

Газоохлаждаемые реакторы хорошо применимы для одновременной выработки, так как они могут производить пар с высокими параметрами, который может либо использоваться в промышленных процессах, либо расширяться в турбине для совместного производства электроэнергии и обеспечения паровых процессов.

В Великобритании несколько установок с реакторами AGR для производства электроэнергии находятся в эксплуатации и достигли стадии усовершенствования конструкции.

Установки с реакторами HTGR вступают в фазу внедрения на рынке США и ФРГ.

Сравнение воздействия на окружающую среду угольных электрических станций и газификационных установок

Процесс	Отходы тепла (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (%)	NO _x (%)	Пыль (%)
Угольная электростанция	100	100	100	100	100
Газификация					
Автотермический	53	57	20	25	20
Ядерный технологический пар	63	31	0	0	0
Ядерное технологическое тепло	37	31	0	0	0

В США реактор прототипной АЭС в Форт-Сент-Врейне для выработки электроэнергии находится в эксплуатации с 1976 г., а в Федеративной Республике Германии в начале 1985 г. будет осуществлен энергетический пуск ториевого высокотемпературного реактора THTR-300, также предназначенного для выработки электроэнергии.

В обеих странах реакторы типа HTGR разрабатываются для производства технологического пара и одновременной выработки электроэнергии. В США выполнен целый ряд исследований, свидетельствующих о больших возможностях рынка для реакторов, одновременно производящих технологический пар и электроэнергию*.

Применение тепловых процессов. Прогресс в разработке реакторов HTGR вызвал исследования в ряде стран, таких как Австрия, Федеративная Республика Германии, Франция, Япония, США и СССР, по использованию высокотемпературной тепловой энергии этих реакторов для газификации бурого и твердого угля.

Для непосредственной газификации угля требуется тепловой процесс с температурой от 800 до 950 °С. Ядерная газификация угля увеличивает эффективность процесса, уменьшает стоимость конечного продукта и значительно снижает воздействие на окружающую среду. Загрязнения двуокисью серы, окислами азота и золой можно полностью избежать, что видно из приводимой таблицы.

Некоторые процессы переработки угля выбраны, как возможные к применению. Полутехнические и опытные установки для газификации угля с про-

* Для подробного ознакомления см. МАГАТЭ, Состояние и перспективы газоохлаждаемых реакторов. Серия Технических отчетов № 235 (апрель 1984 г.).

пускной способностью до 200 тонн угля в день находятся в стадии разработки или уже готовы к эксплуатации*.

Продуктом этих процессов является либо заменитель природного газа (SNG), который может быть непосредственно подан в существующую газовую сеть, либо синтетический газ, представляющий собой смесь монооксида углерода и водорода. Синтетический газ является важным сырьевым материалом для различных промышленных процессов, таких как передел железной руды, производство аммония и жидких вторичных энергоносителей.

Другим потенциально возможным применением ядерных тепловых процессов является передача энергии на большие расстояния посредством газа. Основной принцип заключается в сочетании эндотермической химической реакции (паровое превращение метана в монооксид углерода и водорода), имеющей место в реакторах HTGR, и обратной экзотермической реакции (метанизации) в зоне потребления энергии и тепла. Таким образом, энергия от HTGR передается потребителю в виде химически связанной энергии.

Температуры свыше 600 °C можно получить за счет рекомбинации монооксида углерода и водорода в метан и воду. Ряд исследований этого процесса был выполнен в ФРГ, США и СССР **

Применение высокотемпературных тепловых процессов позволило создать новую энергетическую систему, такую как „Горизонтально интегрированная энергетическая система“, основанную на принципе разложения углеводородного сырья до сжигания и получения основных продуктов (монооксид углерода, водород и кислород), которые могут быть объединены в различных пропорциях для удовлетворения потребностей потребителя в конечной энергии. Преимуществом этой энергетической системы является незначительное воздействие на окружающую среду, даже если в качестве сырья используется низкокачественное органическое топливо.

В перспективе для получения водорода может быть использован метод термохимического разложения воды; высокотемпературный ядерный тепловой процесс обеспечит необходимую тепловую энергию. Широкомасштабное внедрение этого метода, который в настоящее время изучается и экспериментально реализуется в некоторых лабораториях ФРГ, Италии ***, Японии и США, обеспечило бы почти неограниченный источник энергии.

Осуществимость процесса производства высокотемпературного тепла продемонстрирована успешной эксплуатацией реактора AVR с шаровыми

твэлами мощностью 45 МВт (тепловых), работающем с 1967 г. в Центре ядерных исследований (KFA) в Юлихе.

Компоненты теплообменника, необходимые для отбора горячего гелия из реактора, еще требуют дальнейшего исследования и разработки для коммерческого применения.

В международных программах в настоящее время делается упор на высокотемпературные металлические материалы, а также разработку, сооружение и испытание компонентов теплопроводов и теплообменников для больших гелиевых экспериментальных стендов. Значительный прогресс в этой области достигнут за последние несколько лет. Разработаны высокотемпературные материалы, которые являются стойкими при температуре 950 °C. Экспериментальные программы по материалам в ФРГ достигли стадии, на которой ожидаемая долговечность компонентов достигает 70 000–100 000 часов. Гелий/гелиевый промежуточный теплообменник мощностью 10 МВт и паропреобразователь мощностью 5 МВт достигли стадии усовершенствованной конструкции и будут испытаны в 1985 г.

Результаты этих испытаний составляют основу для принятия решений относительно типа и размера будущей прототипной установки для генерации ядерного тепла. В целом ожидается, что технология переработки угля будет готова к внедрению на рынок к 90-м годам.

Потенциал для ключевой роли

Десять лет назад ожидание уменьшения запасов дешевой нефти и газа явилось важным мотивом для внедрения новых технологий замещения или спасения этих энергетических носителей. Однако снижение темпов экономического роста и политика сбережения энергии привели к более низкому ее потреблению, чем ожидалось. В результате в настоящее время в ряде стран наблюдается избыток энергии, и необходимость в новых технологиях выражена гораздо меньше, чем раньше.

Но нужно думать не только о сегодняшнем дне и о ближайшем будущем. Как только начнется новый подъем экономики, мы столкнемся с ростом потребления и ростом дефицита запасов энергии. В противоположность оценкам физических ресурсов, почти невозможно предвидеть события, которые могут оказывать воздействие на снабжение энергией. И поэтому важной задачей всех наций является поиск альтернативных источников энергии. Что касается будущего, то в гарантированном снабжении энергией отдельных стран и в мировом масштабе ядерное теплоснабжение может начать играть основную роль к 90-м годам.

* Для подробного ознакомления см. МАГАТЭ, Состояние и перспективы газоохлаждаемых реакторов. Серия Технических отчетов № 235 (апрель 1984 г.).

** См. Состояние и перспективы газоохлаждаемых реакторов, описание демонстрационной установки (30 МВт) EVA/ADAM с замкнутым циклом — ядерная система для дальнейшей передачи энергии, Центр ядерных исследований (KFA), Юлих, Федеративная Республика Германии.

*** В Объединенном исследовательском центре Исправатом в Варезе, Италия.