

Применение ядерной энергии: теплоснабжение населения и промышленности

Все больше стран проявляют интерес к использованию реакторов меньшей мощности для удовлетворения потребностей промышленности и городского населения в тепле

Когда в октябре 1956 г. в Колдер-Холле, Соединенное Королевство, был введен в эксплуатацию первый ядерный реактор, он давал электричество для энергосети и тепло для соседнего завода по переработке топлива. Более 40 лет спустя четыре блока мощностью по 50 МВт (эл.) в Колдер-Холле все еще находятся в эксплуатации. В Швеции в течение десяти лет, начиная с 1963 г., реактор Agesta поставлял горячую воду для сети центрального отопления в пригороде Стокгольма.

Эти примеры показывают ту сторону ядерной энергии, которая не знакома многим людям, — ее способность давать тепло для технологических процессов и городских нужд. Применение ядерной энергии в таких целях началось практически одновременно с производством ядерными энергетическими реакторами электричества.

Начиная с первых шагов развития ядерной энергетики прямое использование тепла, выработанного на реакторах, постоянно расширялось. Такие страны, как Болгария, Венгрия, Германия, Индия, Казахстан, Канада, Китай, Россия, Словакия, Украина, Чешская Республика, Швейцария, Швеция и Япония, сочли целесообразным, наряду с производством электричества, использовать тепло ядерных источников для центрального отопления, или технологических процессов, или для того и другого вместе. Несмотря на то что на ядерных реакторах в мире производится менее 1% тепла, используемого для нужд центрального отопления и в технологических процессах, наличие признаки возрастающего интереса к этим сферам применения.

В прямом использовании тепла ядерного источника нет ничего нового. В конечном счете процесс деления ядер в реакторе сопровождается выделением тепла. Посредством теплоносителя, циркулирующего через активную зону, тепло выводится из реактора, а затем может быть использовано для производства электричества или для обеспечения горячей водой и паром технологических процессов или обогрева помещений. Существуют, однако, значительные различия между свойствами и сферами применения электричества и тепла, а также между рынками этих разных форм энергии. Эти различия, как и присущие ядерным реакторам свойства, являются причинами того, почему ядерная энергия проникла главным обра-

зом на рынок электричества и находит относительно малое применение в качестве прямого источника тепла.

Рынок энергии

В настоящее время для производства электричества в мире используется около 33% общего объема потребления энергии. Эта доля неуклонно возрастает и, по прогнозам, к 2015 г. достигнет 40%. Основными компонентами остальной части являются тепло, потребляемое в бытовых и промышленных целях, и транспортный сектор, при этом доля бытового и промышленного секторов несколько выше. Практически весь рынок тепла обеспечивается посредством сжигания угля, нефти, газа или древесины.

Общее потребление энергии постоянно растет, и эта тенденция, по всей вероятности, продолжится в следующем столетии. Меры по энергосбережению и повышению КПД энергии в целом позволили снизить темпы роста потребления энергии, но их воздействие недостаточно велико для стабилизации его на нынешнем уровне.

В течение ближайших двух десятилетий ожидается умеренный рост производства электричества на базе ядерной энергии. Никакого применения ядерной энергии в транспортном секторе практически не предвидится, если не считать опосредованного влияния роста потребления электричества.

Рынок тепла открыт для ядерной энергии, но овладеть им сложно. Хотя ядерная энергия и используется для частичного покрытия спроса на тепло, она еще не смогла сколько-нибудь существенно проникнуть на этот рынок. Какую часть рынка она сможет завоевать и как быстро, будет зависеть от того, насколько ядерные реакторы по своим характеристикам будут соответствовать особенностям рынка тепла, с тем чтобы они могли успешно конкурировать с альтернативными источниками энергии.

Характеристика рынка тепла

Теплопередача является трудным и дорогостоящим процессом. Необходимость в трубопроводах, термоизоляции, насосных системах и соответствующих капиталовложениях, потери тепла, обслуживание и потребности в энергии для эксплуатации насосного оборудования делают передачу тепла на

**Бела Й. Чик
и
Юрген Купиц**

Г-н Чик является старшим сотрудником Секции по развитию ядерной технологии МАГАТЭ, а г-н Купиц — руководителем Секции.

расстояния, превышающие несколько километров и, в крайнем случае, несколько десятков километров, нерентабельной. Кроме того, большое влияние оказывает эффект объема: удельные расходы на передачу тепла резко возрастают по мере снижения объема передаваемого тепла. В сравнении с теплом передача электричества с места его производства до конечного потребителя является легкой и дешевой даже на большие расстояния, измеряемые сотнями километров. Основными компонентами общего рынка тепла являются жилищно-бытовой и промышленный секторы. В то время как в рамках жилищно-бытового сектора тепло для приготовления пищи должно производиться непосредственно на месте его использования, тепло для обогрева помещений может обеспечиваться (и часто обеспечивается) расположенной на приемлемом расстоянии системой централизованного теплоснабжения посредством сети передачи и распределения тепла, обслуживающей сравнительно большое число потребителей.

Централизованное теплоснабжение. Установленные мощности сетей централизованного теплоснабжения обычно колеблются в пределах 600—1200 МВт (тепл.) в крупных городах и значительно ниже — 10—50 МВт (тепл.) — в малых городах и небольших населенных пунктах. В редких случаях эти мощности достигают 3000—4000 МВт (тепл.). Очевидно, что потенциальный рынок централизованного теплоснабжения формируется только в климатических зонах с относительно длинными и холодными зимами. Системы централизованного теплоснабжения находят широкое применение в таких странах Западной Европы, как Финляндия, Швеция и Дания. Аналогичный подход применяется также в Австрии, Бельгии, Германии, Франции, Италии, Швейцарии, Норвегии и Нидерландах, хотя и в гораздо меньшей степени. Годовые коэффициенты нагрузки систем централизованного теплоснабжения зависят от продолжительности холодного времени года, когда требуется обогрев помещений, и могут составить примерно 50% — намного ниже базисной нагрузки электростанций. Для обеспечения надежного теплоснабжения жилых помещений необходимы также резервные мощности производства тепла. Это означает, что нужны мощности производственных и резервных установок, соответствующие лишь части общей пиковой нагрузки. Для систем централизованного теплоснабжения необходим диапазон температур от 100 до 150°C.

В целом ожидается существенное расширение рынка централизованного теплоснабжения, и не только потому, что в густонаселенных районах оно может экономически конкурировать с индивидуальными средствами отопления, но также и потому, что оно предоставляет возможность снижения уровней загрязнения воздушной среды в городских районах. Если выбросы, являющиеся следствием сжигания топлива на относительно крупных теплоэлектроцентралях, могут контролироваться и до известных пределов сокращаться, то на мелких индивидуальных отопительных установках, сжигающих газ, нефть, уголь или древесину, это практически неосуществимо.

Технологические процессы. В рамках промышленного сектора технологическое тепло находит самое разнообразное применение в очень широком спектре различных требований и температур. Если в энергоемких отраслях промышленности потребление энергии составляет значительную часть стоимости конечного продукта, то в большинстве других процессов доля энергии равна лишь нескольким процентам. Тем не менее энергоснабжение является важным фактором. Без энергии производство остановится. Это означает, что общей чертой практически всех промышленных потребителей является потребность в гарантированном электроснабжении с весьма высокой степенью надежности и доступности, приближающейся к 100%, что особенно важно для крупных промышленных установок и энергоемких технологических процессов.

Что касается диапазонов мощностей источников необходимой тепловой энергии, то они в большинстве промышленно развитых стран примерно одинаковы. В основном около половины пользователей нуждаются в источниках мощностью менее 10 МВт (тепл.), а еще 40% — от 10 до 50 МВт (тепл.). С увеличением потребностей в энергии отмечается устойчивое сокращение числа ее пользователей. Около 99% пользователей, на счет которых относится около 80% всей потребляемой энергии, имеют мощности в диапазоне 1—300 МВт (тепл.). Остаточная доля рынка технологического тепла приходится на крупных индивидуальных пользователей с энергоемкими технологическими процессами, нуждающимися в источниках тепла мощностью до 1000 МВт (тепл.), а в исключительных случаях — даже выше. Все это свидетельствует о крайней неоднородности рынка технологического тепла.

Возможность широкомасштабного внедрения систем распределения тепла из центрального источника, обслуживающего нескольких сконцентрированных в т. н. индустриальных зонах пользователей, представляется в настоящее время довольно отдаленной, но может стать преобладающей тенденцией в долгосрочной перспективе. В отличие от центрального отопления коэффициенты нагрузки промышленных пользователей не зависят от климатических условий. В основе спроса крупных промышленных пользователей лежат обычно параметры базисной нагрузки.

Требования в области температуры зависят от вида промышленного производства и охватывают широкий диапазон вплоть до 1500°C. Верхний диапазон свыше 1000°C характерен в основном для черной металлургии. Нижний диапазон — примерно от 200 до 300°C — включает такие отрасли, как опреснение морской воды, производство целлюлозы и бумаги, а также текстильную промышленность. Химическая промышленность, переработка нефти, нефтеносных сланцев и песка, а также газификация угля являются примерами отраслей с требованиями к температуре в диапазоне 500—600°C. Цветные металлы, коксование угля и лигнита, производство водорода посредством гидролиза относятся к отраслям, требующим температур в диапазоне 600—1000°C.

Все промышленные пользователи тепла потребляют также электричество. Соотношение этих двух видов энергии колеблется в зависимости от вида процессов, в которых преобладающую роль играет либо тепло, либо электричество. Спрос на электричество может быть удовлетворен или подсоединением к электроэнергосети, или собственной электростанцией. Перспективной альтернативой представляется создание теплоэлектроцентралей. Они обеспечивают повышение общего энергетического КПД и приносят соответствующие экономические выгоды. Теплоэлектроцентрали, входящие в состав крупных промышленных комплексов, могут быть легко интегрированы в систему электросетей, в которые они могут передавать излишки электричества. В свою очередь, они могут использоваться в качестве резервного источника для обеспечения гарантированных поставок электричества. Такие варианты нередко считаются предпочтительными.

Характеристика ядерных источников тепла

С технической точки зрения ядерные реакторы являются в основном теплопроизводящими установками. К настоящему времени накоплен богатый опыт в использовании тепла ядерного источника как в системах централизованного теплоснабжения, так и в технологических процессах, и, таким образом, техническую сторону этой проблемы можно считать решенной. Для использования ядерных реакторов в качестве источников тепла в централизованном теплоснабжении или в технологических процессах не существует никаких технических препятствий; для этих целей могут применяться в принципе любые реакторы любой мощности.

Потенциальное радиоактивное загрязнение сетей централизованного теплоснабжения или изделий, произведенных в рамках технологических процессов, исключается посредством соответствующих мер, таких как создание контуров промежуточных теплообменников с градиентами давления, выступающих в роли эффективных барьеров. Ни на одном реакторе, применявшемся для этих целей, никогда не отмечалось ни одного случая радиоактивного загрязнения.

Что касается температурных диапазонов, то температуры около 300°C получены на легководных и тяжеловодных реакторах, до 540°C — на быстрых реакторах с жидкометаллическим охлаждением, до 650°C — на усовершенствованных газоохлаждаемых реакторах и до примерно 1000°C — на высокотемпературных реакторах с газовым охлаждением.

Для применения в системах централизованного теплоснабжения или в технологических процессах существуют в основном два варианта: комбинированное производство тепла и электричества (теплоэлектроцентрали) и только тепла (тепловые реакторы). Комбинированное производство находит широкое применение, тогда как опыт эксплуатации чисто тепловых реакторов невелик. В принципе количество произведенного на теплоэлект-

рических реакторах тепла зависит только от их проектных пределов. Любые излишки тепла, не находящие спроса, могут быть переориентированы на производство электричества, а это означает высокую степень гибкости. С другой стороны, тепловые реакторы могут быть использованы лишь для одной цели, поскольку они не предназначены для производства электричества.

Эксплуатационная готовность ядерных реакторов в целом аналогична эксплуатационной готовности электростанций на ископаемом топливе. Как показывает опыт, коэффициент готовности на ядерных реакторах может достигать от 70 до 80 и даже 90%. С помощью эффективных мер профилактического технического обслуживания и предупредительного ремонта число и продолжительность внеплановых отключений могут быть сведены к минимуму. Однако коэффициент готовности и надежности реактора никогда не может достичь 100%, необходимых для большинства крупных пользователей тепла. Следовательно, здесь, как и в случае с работающими на ископаемом топливе источниками, требуется резервирование мощностей. Целесообразным решением в данном случае является создание многоблочных теплоэлектростанций, модульных конструкций и резервных источников тепла.

Ядерные реакторы весьма капиталоемки. Доля капитальных затрат в конечной стоимости энергии является преобладающей. Поэтому эксплуатация в режиме базисной нагрузки и, по возможности, с наиболее высоким коэффициентом готовности необходима в целях успешной конкуренции с альтернативными источниками. Это возможно только при условии, когда спрос на рынке тепла соответствует характеристикам базисной нагрузки или когда совокупный рынок электричества и тепла позволяет эксплуатировать теплоэлектроцентральный в режиме общей базисной нагрузки.

Ядерные реакторы могут быть отработанными с технической точки зрения, безопасными, надежными и экологически чистыми источниками энергии, но для коммерческого внедрения они должны быть и экономически конкурентоспособными по отношению к альтернативным источникам энергии. По сравнению с источниками на ископаемом топливе ядерные реакторы характеризуются более высокими капиталовложениями, которые компенсируются более низкой стоимостью топлива. Проникновение ядерной энергии на рынок электричества было бы невозможным без выполнения условия экономической конкурентоспособности. Несмотря на преобладание низких цен на ископаемое топливо, ядерная энергия сохранила свои конкурентоспособные позиции в большинстве регионов мира. В случае предполагаемого роста цен на ископаемое топливо экономической конкурентоспособное положение ядерной энергии как в области производства электричества, так и в сфере теплоснабжения улучшится.

Благодаря эффекту размера экономические показатели ядерных реакторов, как правило, лучше у более крупных установок. Это привело к разработке и внедрению развитых странах с разветвленными взаимосвязанными

ми системами сетей электроснабжения преимущественно крупных реакторов. Тем не менее был и существует в настоящее время рынок для энергетических реакторов малой и средней мощности (SMR). Современные конструкции малых и средних реакторов не являются уменьшенными вариантами крупных коммерческих реакторов, и ставится цель сделать их экономически конкурентоспособными.

Серьезной проблемой даже в тех странах, которые продолжают свои ядерные программы, разрабатывая новые проекты, становится выбор площадок для атомных электростанций. В последнее время обычной практикой стало строительство дополнительных блоков на существующих площадках, а освоение новых площадок для атомных электростанций является редким событием. Экономические факторы заставляют выбирать площадки даже для электростанций как можно ближе к центрам потребления. Для теплоэлектроцентралей и тепловых реакторов это — практически обязательное условие. Однако синдром NIMBY (где угодно, только подальше от моего дома) представляет собой важный фактор, влияющий на выбор площадки. В результате во избежание потенциальных конфликтов и протестов возникла тенденция выбирать площадки в отдаленных, но доступных местах. Выбор площадок на удалении от густонаселенных районов облегчает также соблюдение регулирующих требований, которые становятся все более жесткими. Можно полагать, что реакторы усовершенствованной конструкции, в особенности в диапазоне SMR с улучшенными характеристиками безопасности, будут приемлемы для населения с точки зрения их размещения вблизи населенных мест. Их также легче привести в соответствие с регулируемыми требованиями; они позволяют поддерживать расходы на теплопередачу в разумных пределах.

В ядерной энергетике, в отличие от многих других промышленных отраслей, главную роль играет долгосрочная перспектива. На завершение планирования, проектирования, подготовительных работ и лицензирования любого ядерного реактора требуются годы. Реакторы проектируются и строятся с учетом их эксплуатации в течение 40 и более лет, а для достижения ожидаемых экономических выгод они должны функционировать с высокими коэффициентами нагрузки в течение всего срока их экономической службы. Существуют также требования к инфраструктуре, для развития которой, при ее отсутствии, нужны время и серьезные усилия. Эти усилия считаются оправданными лишь с точки зрения долгосрочной перспективы развития ядерной программы.

Перспективы применения тепла ядерных источников

Концепция технической осуществимости применения ядерных источников тепла в системах централизованного теплоснабжения и в технологических процессах появилась в самом начале развития ядерной энергетике. Однако существенно проникновения на коммерческий рынок тепла

пока не произошло. Его перспективы будут зависеть в основном от того, где и насколько возможности ядерных реакторов могут быть приведены в соответствие со спросом на рынке тепла.

Рынок централизованного теплоснабжения. Одним из источников поставок тепла на рынке централизованного теплоснабжения являются теплоэлектрические реакторы. Из-за ограниченных потребностей в энергии на рынке тепла и относительно низких коэффициентов нагрузки для средних и крупных реакторов основным продуктом станет электричество, а доля централизованного теплоснабжения в общем объеме произведенной энергии будет незначительной. Эти реакторы, включая выбор площадок для них, должны быть оптимизированы для характерных условий рынка электричества, при этом тепло для централизованного теплоснабжения будет являться, по сути, побочным продуктом. При расположении таких реакторов вблизи населенных пунктов в холодных климатических зонах они могут также удовлетворять и нужды централизованного теплоснабжения. Так делается в России, Украине, Чешской Республике, Словакии, Венгрии, Болгарии и Швейцарии, причем на каждой станции используется примерно 100 МВт (тепл.). Такое применение может иметь место в будущем везде, где для этого существуют подобные условия.

Доля тепловой энергии, производимой на небольших теплоэлектрических реакторах мощностью до 300 МВт (эл.) и 150 МВт (эл.) для нужд централизованного теплоснабжения, будет больше. Однако по экономическим причинам электричество все же останется, как следует ожидать, основным продуктом, если предположить, что станции будут эксплуатироваться в режиме базисной нагрузки. Сфера применения этих реакторов будет аналогичной сфере применения средних и крупных реакторов двойного назначения, однако, кроме того, они могут использоваться и для решения специфических задач, таких как энергоснабжение при концентрированных нагрузках в удаленных и холодных районах мира.

Другим выбором является использование чисто тепловых реакторов для централизованного теплоснабжения. Такое применение реализовано в исключительно малых масштабах [несколько МВт (тепл.)] в рамках экспериментальных или демонстрационных проектов. В России в 1983—1985 г. было начато строительство двух блоков мощностью 500 МВт (тепл.), но затем оно было приостановлено. В Китае в настоящее время разрабатывается несколько проектов, а вскоре планируется начало строительства блока мощностью 200 МВт (тепл.). Очевидно, что потенциальное применение чисто тепловых реакторов для централизованного теплоснабжения ограничивается реакторами весьма малой мощности. Эти реакторы проектируются для размещения в пределах населенных центров или в непосредственной близости от них с целью сведения к минимуму расходов на теплопередачу. Но и при таких условиях трудно добиться экономической конкурентоспособности из-за относительно низких коэффициентов нагрузки, за исключением некоторых отдаленных районов, где высоки цены на ископаемое топливо и очень длинные и холодные зимы.

В итоге можно сказать, что перспективы использования ядерной энергии для централизованного теплоснабжения вполне реальны, но ее применение ограничено теми случаями, когда есть возможность точно выполнить конкретные условия, касающиеся как рынка централизованного теплоснабжения, так и ядерных реакторов. Перспективы применения реакторов двойного назначения, особенно малой и средней мощности, по сравнению с чисто тепловыми реакторами представляются более обнадеживающими, главным образом по экономическим причинам.

Технологическое тепло. Характеристики рынка технологического тепла существенно отличаются от характеристик рынка централизованного теплоснабжения, хотя есть и отдельные общие черты, в частности касающиеся необходимости минимальных расстояний для теплопередачи. Однако пользователи технологического тепла не обязательно должны располагаться в пределах густонаселенных районов, которые по определению составляют рынок централизованного теплоснабжения. Многие пользователи технологического тепла, особенно крупные, могут находиться и обычно находятся вне городских районов и зачастую на значительном удалении от них. Это делает совместное расположение ядерных реакторов и промышленных пользователей технологического тепла не только жизнеспособным с точки зрения производства, но и желательным с целью резкого сокращения и даже исключения расходов на теплопередачу.

Крупные реакторы обычно строятся в виде многоблочных станций. При использовании их в режиме комбинированного производства тепла и электричества последнее всегда будет основным продуктом. Поэтому такие станции должны быть включены в систему электросетей и оптимизированы для производства электричества. Для реакторов в диапазоне SMR, и в частности малых и очень малых мощностей, доля производства технологического тепла будет большей, и тепло может даже стать преобладающим продуктом. Данное обстоятельство способно оказать влияние на критерии оптимизации станции и создать потенциально более привлекательные условия. Таким образом, перспективы для реакторов малой и средней мощности при использовании их в качестве теплоэлектроцентралей, производящих электричество и технологическое тепло, значительно более благоприятны по сравнению с реакторами большой мощности.

Несколько действующих ядерных теплоэлектроцентралей уже поставляют тепло промышленным пользователям. Самые крупные проекты осуществлены в Канаде (Брус, производство тяжелой воды, и другие промышленные/сельскохозяйственные пользователи) и в Казахстане (Актау, опреснение морской воды). Другие энергетические реакторы, используемые в настоящее время только для производства электричества, могут быть конвертированы в целях комбинированного производства тепла и электричества. Если вблизи от установки расположен крупный пользователь технологического тепла, заинтересованный в получении

данного продукта, соответствующая конверсия на комбинированное производство технически осуществима. Однако она потребует дополнительных расходов, которые должны быть подтверждены данными анализа затрат и результатов. Некоторые проекты конверсии такого рода могли бы быть реализованы, но в целом подобный выбор представляется малоперспективным.

Более перспективно строительство новой ядерной теплоэлектроцентрали рядом с уже существующим и заинтересованным промышленным пользователем. Еще лучше было бы осуществить совместный проект, в рамках которого как ядерная теплоэлектроцентраль, так и промышленная установка, нуждающаяся в технологическом тепле, планируются, проектируются, строятся и, наконец, эксплуатируются вместе как интегрированный комплекс.

Современные и усовершенствованные легководные или тяжеловодные реакторы производят тепло в диапазоне низких температур, что отвечает требованиям ряда технологических процессов. В числе их наиболее перспективным представляется сейчас опреснение морской воды. Реакторы других типов, например быстрые реакторы с жидкометаллическим охлаждением и высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы, также могут производить низкотемпературное тепло, но, кроме того, на них возможно получение и более высоких температур. Это обстоятельство расширяет возможности их практического применения. Такие реакторы, правда, нуждаются в существенных доработках с целью достижения коммерческой готовности. Если они, как ожидается, достигнут экономической конкурентоспособности, возможности их использования в среднесрочной и долгосрочной перспективе представляются многообещающими, особенно в сфере применения высокотемпературного тепла в промышленности.

Чисто тепловые реакторы еще не нашли применения для поставок технологического тепла в промышленных/коммерческих масштабах. Был разработан ряд проектов и построено несколько демонстрационных реакторов. Как показали результаты многочисленных исследований, экономическая конкурентоспособность таких реакторов считается вполне достижимой целью. Но все это еще должно быть подтверждено практикой. Потенциальный рынок для чисто тепловых реакторов будет ограничен реакторами исключительно малых мощностей, т. е. ниже 500 МВт (тепл.).

Перспективы использования ядерной энергии для целей централизованного теплоснабжения и в технологических процессах тесно увязаны с перспективами ввода в действие реакторов малой и средней мощности (SMR). Последний анализ рынка реакторов SMR показал, что примерно в 30 странах планируется строительство до 2015 г. от 70 до 80 новых блоков. Было также установлено, что примерно треть этих реакторов будет использоваться конкретно для ядерного опреснения. Значительная часть остальных реакторов в дополнение к электричеству будет производить тепло, и лишь несколько, как ожидается, будут использованы в качестве чисто тепловых реакторов. □