

# Ядерная энергия в целях теплоснабжения

*Одновременное производство электроэнергии и тепла является перспективным направлением*

Х. Барнерт,  
В. Кретт  
и Дж. Купитц

**К**ак было отмечено на заседании Всемирного энергетического совета, для удовлетворения потребностей растущего населения Земли в будущем потребуются увеличить производство электроэнергии. В то же время, с точки зрения Межправительственного совета по изменению климата и других организаций, серьезные и крупные проблемы возникают в области охраны окружающей среды, включая парниковый эффект, связанный с выбросами в атмосферу двуокиси углерода и других газов в результате сжигания органического топлива.

Ядерная энергия обладает потенциалом, который мог бы внести определенный вклад в решение таких проблем. Она уже стала ценным энергетическим источником, имеющим важные преимущества с точки зрения окружающей среды. Доля ядерной энергии в мировом производстве электричества в настоящее время составляет 17 %.

И в то же время ее потенциал используется сейчас лишь частично. Данная технология может играть еще более важную роль в обеспечении адекватных поставок энергии за счет производства электричества и тепла в бытовых, промышленных и других целях.

## Области использования энергии

В мире около 30 % общего количества первичной энергии используется для производства электроэнергии. Основная часть оставшихся 70 % применяется или в транспортных целях, или превращается в горячую воду, пар и тепло. Это указывает на наличие довольно значительного неэлектроэнергетического рынка, в частности, рынка горячей воды и пара.

В настоящее время для производства электричества ядерная энергия исполь-

зуется более чем в 24 странах. Сейчас насчитывается примерно 423 действующих АЭС общей электрической мощностью около 324 ГВт и чуть более 80 строящихся энергоблоков общей мощностью примерно 80 ГВт. Лишь незначительное число этих станций используется в данный момент для производства и поставок горячей воды и пара. Общая тепловая мощность таких станций составляет менее 5 ГВт, и действуют они лишь в нескольких странах, главным образом в Канаде и СССР.

Существует много причин, обуславливающих такое непропорциональное производство электроэнергии и тепла с использованием ядерной энергии. К их числу относятся отсутствие единого рынка одновременного производства электроэнергии и тепла, размеры энергосистем, низкая стоимость получения тепла с помощью других источников энергии, а также высокие транспортные расходы и затраты на распределение энергии.

Температурные параметры значительно колеблются в зависимости от области применения тепла. (См. соответствующий график.) Они варьируются от низких температур, примерно в диапазоне комнатной температуры, необходимых для производства горячей воды и пара для агропромышленного сектора, городского теплоснабжения и опреснения морской воды, и до 1000 °С для производства технологического пара и тепла в химической промышленности и инъекции пара под высоким давлением для повышения отдачи нефтеносных пластов, песков и горючих сланцев, производства олефина, повышения эффективности процессов нефтеперегонки и обогащения каменного и бурого угля. В верхней части этого диапазона находится процесс расщепления воды для получения водорода. До температуры порядка 550 °С тепло можно передавать в виде пара; выше данного уровня такие параметры должны непосредственно обеспечиваться за счет технологического тепла, т.к. для получения более высоких температур требуется значительно более высокое давление пара. Верхний предел, равный 1000 °С для технологического тепла, производимого с

Г-н Барнерт работает в Научно-исследовательском центре в Юлихе, Германия, а г-да Кретт и Купитц являются штатными сотрудниками Отдела ядерной энергетики МАГАТЭ.

помощью ядерной энергии, обусловлен долгосрочными прочностными характеристиками металлических реакторных материалов.

Конечно, существуют промышленные процессы, для которых требуются температуры выше 1000 °С, например, производство стали. В таких целях ядерную энергию можно использовать только с помощью вторичных энергоносителей, таких, например, как электроэнергия, водород и синтез-газ.

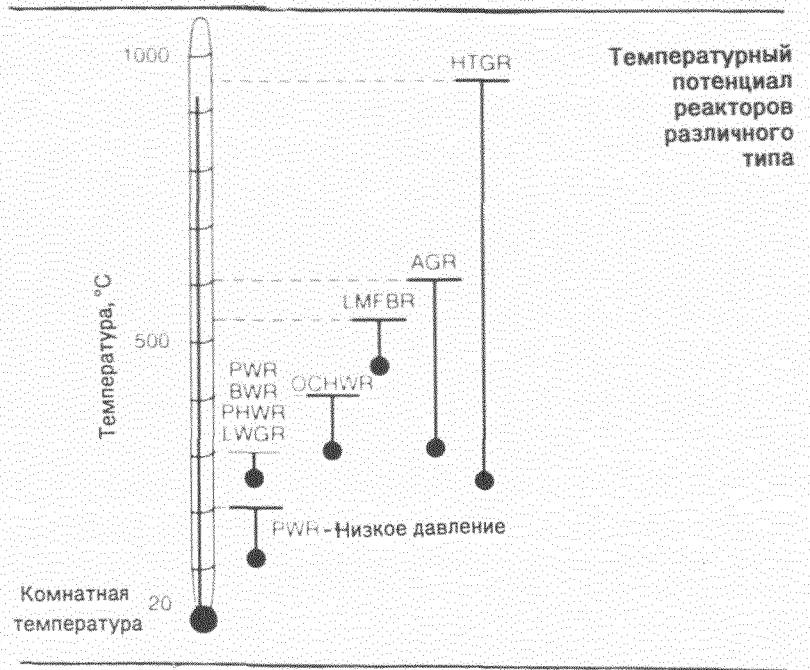
**Возможности реакторов**

На всех АЭС основным процессом, происходящим в активной зоне реактора, является превращение ядерной энергии в тепло. Следовательно, все ядерные реакторы можно в принципе использовать для производства технологического тепла. Однако на практике решающую роль играют два фактора: температура произведенного тепла (первичного теплоносителя) и давление произведенного пара (в некоторых случаях).

Говоря о первом факторе, реакторы с водяным теплоносителем дают тепло с температурой до 300 °С. К их числу относятся реакторы с водой под давлением (PWR), реакторы с кипящей водой (BWR), реакторы с тяжеловодным замедлителем под давлением (PHWR) и легководные реакторы с графитовой замедлителем (LWGR). Реакторы с органическим теплоносителем и графитовым замедлителем (ОСНВР) позволяют получать температуры порядка 400 °С, в то время как на быстрых реакторах-размножителях с жидкометаллическим теплоносителем (LMFBR) температура достигает 540 °С. Реакторы с газовым охлаждением обеспечивают еще более высокую температуру – около 650 °С на усовершенствованных реакторах с газовым охлаждением и графитовым замедлителем (AGR) и 950 °С на высокотемпературных реакторах с газовым охлаждением и графитовым замедлителем (HTGR). (См. график.)

В дополнение к максимальной температуре первичного теплоносителя другим важным фактором является разница температур теплоносителя на входе и выходе.

Давление производимого пара играет важную роль в повышении отдачи нефтеносного пласта: чем больше глубина его залегания, тем выше должно быть давление инжектируемого пара. В этой области преимущества имеют реакторы, на которых вместо воды используются другие теплоносители – ОСНВР, LMFBR, AGR и HTGR. С их помощью можно легко получать инжекционный пар более высокого давления (например, 10 МПа) при глубине залегания пласта около 500 м. Для получения такого давления на реакторах с водяным теплоносителем потребуется дополнительная степень сжатия пара.



Температурный потенциал реакторов различного типа

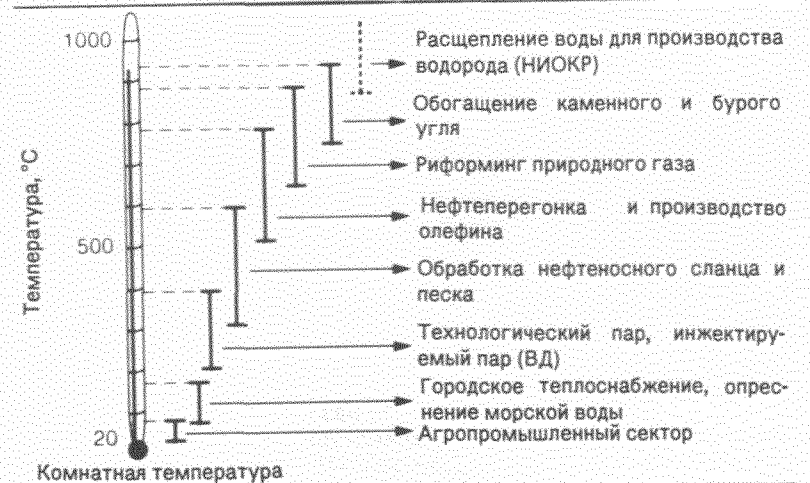
**Термодинамика производства электроэнергии и тепла**

Как отмечалось выше, основным конверсионным процессом, протекающим в ядерных реакторах, является превращение ядерной энергии в тепло.

Это тепло можно использовать в „целенаправленном“ эксплуатационном режиме для прямого нагрева. В этом случае производства электроэнергии не происходит.

Другим рабочим режимом является одновременная генерация тепла и электроэнергии. Параллельное производство достигается путем отбора части пара из вторичного контура парогенератора до входа в турбину. Последовательное производство тепла и электроэнергии осуществляется путем отвода в какое-то время части или всего пара на стадии расширения пара в турбине, когда его температура

Температурные диапазоны потребления тепла в типичных промышленных процессах



соответствует предполагаемой цели его использования. Кроме того, в течение данного цикла отбираемый пар используется для производства электроэнергии. Последовательное производство идеально соответствует промышленным процессам, связанным с городским теплоснабжением, опреснением морской воды и сельским хозяйством.

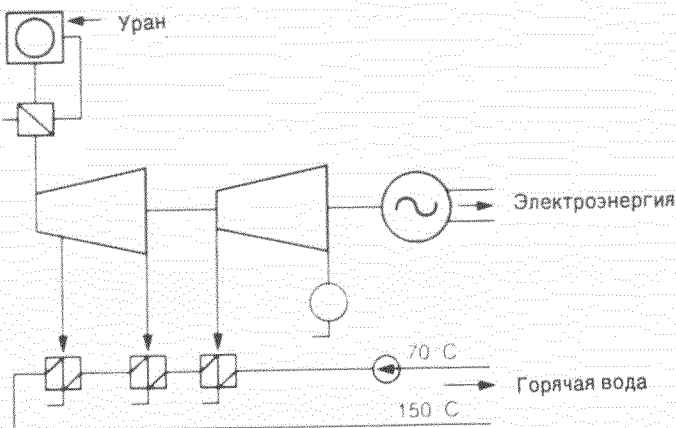
### Примеры областей применения

В настоящее время в ряде стран имеются ядерные установки, используемые для производства горячей воды и пара. Их общая тепловая мощность составляет менее 5 ГВт.

В этих странах, особенно в Советском Союзе, получен значительный опыт в области одновременного производства тепла и электроэнергии. Этот опыт распространяется на реакторы в Белоярске, Курске, Нововоронеже, Ровно и на Кольской АЭС в Советском Союзе; университет Цинхуа в Китае; компанию „Брюс нуклиар пауэр девелопмент” в Канаде; АЭС в Богунице, Чехословакия; реакторы в Гесгене и Бецнау в Швейцарии и Штаде в Германии.

Ниже приводится краткий технический обзор некоторых областей такого применения ядерной энергии.

Схема одновременного производства горячей воды и электроэнергии на АЭС в Богунице, Чехословакия



**Реактор теплоснабжения в Китае.** Эксплуатация ядерного теплового реактора мощностью 5 МВт в Институте ядерно-энергетической технологии (INET) Университета Цинхуа в Пекине началась зимой 1989–1990 гг. для теплоснабжения центра INET; он имеет очень хороший эксплуатационный опыт. По своей конструкции это реактор с водой под давлением. Проектное давление в первом контуре составляет 1,5 МПа (примерно в 10 раз меньше, чем на обычном PWR) и температурный режим первого контура равен 186/146 °С. Температура в промежуточном контуре составляет

160/110 °С при давлении 1,7 МПа, а в тепловой сети – 90/60 °С.

**Параллельное производство технологического пара и тепла в Канаде.** Установка компании „Брюс нуклиар пауэр девелопмент” в Онтарио, Канада, является примером широкомасштабного применения технологического пара. Реакторы PHWR типа Candu, расположенные на этой площадке, могут производить свыше 6000 МВт электроэнергии, а также технологический пар и тепло для дальнейшего использования компанией „Онтарио хайдро” и в прилегающем промышленном энергетическом парке.

АЭС Брюс-А состоит из четырех энергоблоков электрической мощностью 825 МВт, производящих электроэнергию. Кроме того, она поставляет пар на паропреобразующую установку. Данная установка генерирует 720 МВт технологического тепла и пара для установок, на которых производится тяжелая вода, 70 МВт – для энергетического центра Брюс и 3 МВт – для побочных услуг.

Это типичный цикл параллельного производства. Ядерное тепло, полученное в реакторе, направляется в парогенератор по первому теплообменному контуру. Отвод пара из второго контура парогенератора осуществляется параллельно с подачей пара в турбину, а затем он направляется непосредственно на паропреобразующую установку. Для производства электроэнергии отведенный пар не используется.

**Последовательное производство горячей воды для городского теплоснабжения в Чехословакии.** АЭС в Богунице насчитывает два реактора советской конструкции типа ВВЭР-440/230 и два реактора типа ВВЭР-440/213. Все энергоблоки являются действующими. Каждый энергоблок состоит из реактора тепловой мощностью 1375 МВт, шести горизонтальных парогенераторов и двух конденсационных турбин. Энергоблоки одновременно производят электроэнергию и низкотемпературное тепло, используемое для городского теплоснабжения, а также в промышленных и сельскохозяйственных целях в районе Трнав.

В последовательном цикле одновременного производства электроэнергии и тепла вода нагревается до 70 и 150 °С; турбины способны производить 60 МВт тепла. (См. упрощенную технологическую схему.)

**Последовательное одновременное производство тепла и электроэнергии для опреснения морской воды в СССР.** Эксплуатация полезных ископаемых в засушливых районах Западного Казахстана в СССР стала возможной после решения проблемы поставок воды и электроэнергии. Важный вклад в эти усилия внес энергетический комплекс в г. Шевченко. Он включает в себя реактор на быстрых нейтронах БН-350, три тепловые электростанции и опреснительный завод с оборудованием для тепловой перегонки морской воды. Данный

комплекс является первым в мире и пока еще единственным опреснительным комплексом, в котором ядерный реактор используется для опреснения морской воды.

В этом процессе пар поступает с парогенераторов БН-350 и котельного агрегата на несколько различных турбин. Пар с энергоблока БН-350 поступает под давлением 4,5 МПа и с температурой 450 °С на турбины с противодавлением и конденсационную турбину. А с турбин с противодавлением пар направляется на опреснительные батареи и промышленные предприятия города.

Комплекс в г. Шевченко является самым крупным центром промышленного опреснения морской воды в СССР. На комплексе имеются 12 действующих опреснительных батарей общей производительностью 140000 м<sup>3</sup> дистиллята в день.

### Экономика одновременного производства тепла и электроэнергии с помощью ядерной энергии

Производство электроэнергии на АЭС, а также инфраструктура, необходимая для транспортировки и распределения горячей воды и пара, являются капиталоемкими технологиями. Несмотря на то, что АЭС доказали свою экономическую конкурентоспособность в области производства электроэнергии, на режимы одновременного производства тепла и электроэнергии влияют различные факторы стоимости.

Можно использовать следующее эмпирическое правило: стоимость одновременного производства тепла равна стоимости электроэнергии, поделенной на КПД установки, а данный фактор зависит от типа рассматриваемого реактора и других параметров.\*

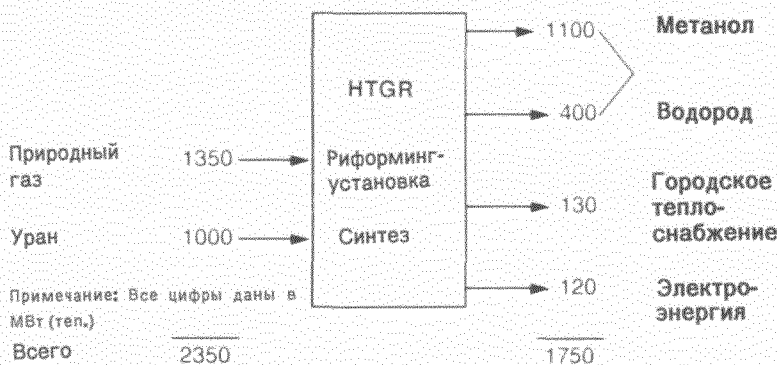
Используя данное правило, были рассчитаны издержки одновременного производства тепла и электроэнергии, например, на модульном высокотемпературном реакторе с газовым охлаждением (МНТГР) в Германии. В этом случае стоимость электроэнергии равна 5 центам США за киловатт-час электроэнергии, стоимость пара – 1,7 цента США за киловатт-час тепла, а стоимость горячей воды – 0,5 цента за киловатт-час тепла. Эти показатели являются выравненными за 40-летний период эксплуатации МНТГР.

### Интеграция ядерной энергии и энергии органического топлива

Свыше 80 % используемой в мире энергии получают за счет энергетических источников, работающих на ископаемом топливе, а именно угле, нефти и газе. Известно, что сжигание этих видов топлива является причиной возникновения серьезных экологических проблем, обусловленных выбросами в атмосферу окисей серы, окисей азота и двуокиси углерода.

Один из предложенных подходов, который может оказать помощь в решении этих проблем, заключается в интеграции энергетических систем. Одним из типичных примеров будущей интеграции является использование ядерного тепла для риформинга природного газа. (См. схему.) Синтез-газ, метанол, водород, тепло и электроэнергия будут получены из природного газа и урана с использованием технологии, известной как НТГР-риформинг процесс. В этом процессе природный газ разлагается в основном на водород и моноокись углерода. Основными продуктами являются метанол, жидкий углеводород и водород. В качестве побочных продуктов получается тепло и электроэнергия.

Использование ядерного тепла для риформинга природного газа



Другой областью применения этого комплексного подхода является нефтяная промышленность. Было проведено несколько исследований по использованию ядерной энергии в качестве источника тепла для эксплуатации месторождений нефти. Они показали, что в случае благоприятной конъюнктуры на нефтяном рынке ядерная альтернатива имеет экономические и экологические преимущества по сравнению с традиционными методами.

Третий пример интеграции ядерной энергии и энергии угля связан со сталелитей-

\*Конкретно КПД определяется как  $\eta = H_p / \Delta E$ , где  $H_p$  – произведенное тепло, а  $\Delta E$  является разницей между электроэнергией в режиме производства только электроэнергии и электроэнергией в режиме одновременного производства.

ной промышленностью. С технологической точки зрения это наиболее амбициозная интеграция. Она включает в себя газификацию каменного угля, нагреваемого с помощью горячего гелия, поступающего от HTGR. Промежуточными продуктами являются синтез-газ и кокс, который используется для восстановления железной руды, а конечными продуктами – метанол и чугуны.

### Перспективный потенциал

Существуют значительные стимулы к использованию мощностей большинства АЭС для производства пара и тепла в целях городского и промышленного теплоснабжения.

В ряде стран одновременное производство электроэнергии и тепла с использованием ядерных реакторов уже является эффективным способом удовлетворения различных энергетических потребностей.

Данная технология обладает перспективным потенциалом более широкого применения. По мере усиления беспокойства, обусловленного экологическими и другими проблемами, возникающими в результате сжигания органического топлива, к этой технологии снова стал проявляться интерес на международном уровне.

В рамках своей деятельности МАГАТЭ в 1990 г. созвало совещание экспертов для анализа положения дел в области одновременного производства тепла и электроэнергии с использованием ядерных реакторов и тепловых систем. Кроме того, был подготовлен для публикации технический документ об использовании ядерной энергии для производства пара и горячей воды, предназначенный для расширения обмена опытом в этой области.

По мере возрастания энергетических потребностей данная технология, возможно, будет заслуживать более тщательного анализа.