

УДК 621.039.52.034.3

## Перспективы использования и основные проблемы внедрения ВТГР в технологические процессы и электроэнергетику

ЛЕГАСОВ В. А., ПОНОМАРЕВ-СТЕПНОЙ Н. Н., ПРОЦЕНКО А. Н., ЧЕРНИЛИН Ю. Ф., ГРЕБЕННИК В. Н.,  
СТОЛЯРЕВСКИЙ А. Я.

Широкое и всестороннее обсуждение различных проблем перспективного развития энергетики вызвано возрастающими трудностями обеспечения страны дешевой энергией и энергоресурсами, уровень потребления которых достиг значительных масштабов.

Трудности развития энергетики обусловлены постоянным удорожанием органических ресурсов, и в первую очередь нефти и газа, наиболее удобных и широко используемых источников энергии, запасы которых ограничены; необходимостью учета экологических факторов, которые удорожают производство энергии и вносят дополнительные ограничения на масштабы и размещение энергопроизводящих станций; а также большой «инерционностью» энергетики — наиболее трудоемкой и капиталоемкой отрасли хозяйства, вследствие чего необходимо задолго до широкого внедрения в топливно-энергетический баланс (ТЭБ) станции новых энергетических направлений создавать прототипные установки.

Все это требует расширения областей применения ядерной энергетики в топливно-энергетической структуре страны и максимальной эффективности ее использования [1,2]. Важным в развитии энергетики в ближайшем будущем является постепенная замена жидкого и газообразного органического топлива [1, 3, 4].

В настоящее время ядерная энергетика практически используется для производства электроэнергии и заменяет органическое топливо, необходимое для ее выработки. Развитие ядерной энергетики в европейской части Советского Союза позволит существенным образом уменьшить дефицит энергоресурсов этого района. Однако функции АЭС в вытеснении дефицитного углеводородного топлива довольно ограничены. Поскольку освоенные энергетические реакторы предназначены для использования в основном в базисной части нагрузок энерго-

системы, то их внедрение вытесняет из энергобаланса конденсационные электростанции, работающие на угле.

Из данных табл. 1 видно, что наибольшее потребление топливно-энергетических ресурсов, в том числе нефти и газа, необходимо при выработке средне- и низкопотенциального тепла и пара, высокопотенциального тепла для технологических процессов (металлургия, химия и др.) и для обеспечения народного хозяйства моторным топливом. Кроме того, газомазутное топливо используется в производстве пиковой и полупиковой энергии.

Потребление газообразных топлив в некоторых из этих областей частично может быть сокращено при использовании атомных станций теплоснабжения (АСТ) в производстве низкопотенциального тепла и освоенных АЭС в некоторых технологических процессах для комплексного обеспечения низкопотенциальным теплом и электроэнергией. Возможности использования атомной энергии на базе освоенных реакторов, в целях вытеснения газообразных энергоресурсов, ограничены. Более широкие перспективы открываются при создании и внедрении высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР).

Принципиальная особенность ВТГР — получение тепла при температуре  $\sim 1000^\circ\text{C}$  и выше. Такая температура позволит внедрить эти реакторы в различные теплофикационные, энерготехнологические и другие процессы и вытеснить дефицитное углеводородное топливо. В табл. 2—4 рассматриваются области возможного применения ВТГР. Потенциальные масштабы развития ВТГР рассмотрены на примере использования высокотемпературного тепла для паровой конверсии метана и приведены в табл. 2.

Около 20% всего органического топлива, которое будет добываться в 1980 г., должно расходоваться на производство высокотемпе-



Структура потребления топливно-энергетических ресурсов, % ТЭБ

Таблица 1

| Область потребления                                           | Период 1970—1980 гг. |                                         | На перспективу *** |                   | Потенциальная доля ядерной энергетики |                                     |
|---------------------------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
|                                                               | Всего *              | Доля нефти и газа (на конец периода) ** | Всего              | Доля нефти и газа | ЛВР ****                              | ВТГР                                |
| Выработка электроэнергии                                      | 25                   | 13                                      | 30—35              | ~ 10              | До 20—25                              | До 25—28                            |
| Выработка тепла и пара среднего и низкого потенциала          | 32                   | 22                                      | 25—30              | ~ 20              | До 8—10                               | До 25                               |
| Выработка высокопотенциального тепла                          | 19                   | 14                                      | 14—16              | 10                | —                                     | До 12—14                            |
| Мобильные и стационарные силовые установки                    | 18                   | 14                                      | 16                 | 15                | —                                     | Производство синтетического топлива |
| В химической, нефтехимической промышленности в качестве сырья | 6                    | 5                                       | 10                 | ~ 8               | —                                     | —                                   |
| Всего                                                         | 100                  | 68                                      | 100                | 60                |                                       |                                     |

\* По данным [5], в среднем за период.  
 \*\* По оценкам авторов, выполненным с учетом структуры потребления нефти и газа по данным [5] и масштабов потребления нефти и газа на 1980 г. по данным [6].  
 \*\*\* По оценкам авторов с учетом основных тенденций изменения ТЭБ и прогнозов, например [3].  
 \*\*\*\* Легководные реакторы (ВВЭР, РВМК).

ратурного тепла. При этом 60—70% расходуемого на эти цели топлива составит дефицитное углеводородное топливо, и эта доля в течение ближайших 15—20 лет существенно не изменится. Высокотемпературный потенциал необходим при производстве аммиака и аммиачных удобрений, синтетического спирта, водорода и др., а также в металлургии на прямое восстановление железа, доменные процессы и т. д.

Ключевой проблемой большинства высокотемпературных процессов является производство различных восстановителей, и особенно водорода, которые могут быть получены с помощью ВТГР. Из органического топлива водород как сырье получают паровой конверсией метана или газификацией угля (см. табл. 2). В перспективе неограниченный источник водорода может обеспечить термохимическое или термоэлектрохимическое разложение воды (табл. 3). Получение восстановителей, и особенно водорода, с помощью ВТГР позволяет вытеснить все расходуемое органическое топливо из этой области энергопроизводства.

Таким образом, применение ВТГР в энергоемких технологических производствах открывает широкую перспективу для развития и использования ядерной энергетики, что может

положительно сказаться на решении проблемы охраны окружающей среды.

Как было отмечено выше, наибольшая доля добываемых органических энергоресурсов, и в том числе углеводородных, расходуется на производство средне- и низкопотенциального тепла и пара. Часть концентрированных потребителей низкопотенциального тепла может быть обеспечена АСТ на базе освоенных реакторов. Высокая доля газомазутного топлива необходима для децентрализованного бытового и промышленного теплоснабжения с малой концентрацией энергопотребления, перевод которого на уголь затруднен в силу технико-экономических и экологических причин. Один из возможных путей решения этой проблемы открывают атомные станции дальнего теплоснабжения (АСДТ). В этом случае ВТГР используется для паровой конверсии метана с передачей охлажденных продуктов конверсии ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ) (рис. 1) по газовым коммуникациям к местам потребления тепла, где осуществляется обратная реакция метанизации с тепловыделением. Температура при метанизации ~ 450—650 °С. При этом  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  почти полностью превращаются в метан, который по трубопроводам может быть возвращен в реактор.



Атомные энерготехнологические процессы с ВТГР на основе конверсии метана

Таблица 2

| Область применения                     | Тип технологического производства               | Продукт производства                                         | Вытесняемый газ (магут) на АЭТУ мощностью 300 МВт (тепл.) |                    | Экономическая эффективность                        | Потенциальные объемы вытесняемого топлива при внедрении АЭС с ВТГР, млн. т усл. т. год |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
|                                        |                                                 |                                                              | млрд. м <sup>3</sup> год                                  | млн. т усл. т. год |                                                    |                                                                                        |
| Сокращение потребления природного газа | Паровая конверсия метана для получения водорода | Аммиак, аммиачные удобрения, синтетический спирт, водород    | 1,7                                                       | 2,1                | Снижение себестоимости на 10—15%                   | 30—50 (при АЭС, на 15—20 млн. т аммиачных удобрений)                                   |
|                                        | Прямое восстановление руды                      | Губчатое железо                                              | 1,5                                                       | 1,8                | Не оценивалась                                     | 2—3 (20 млн. т губчатого железа)                                                       |
|                                        | Восстановление руды в домнах                    | Чугун                                                        | 1,4—1,6                                                   | 1,7—2,0            | Не оценивалась                                     | 5—6 (30—40 млн. т чугуна)                                                              |
| Производство синтетического топлива    | Газификация угля                                | Синтетический газ                                            | 3—3,2                                                     | 3,6—3,8            | 40—50 руб./т усл. т.                               | 60—70 (при газификации 50 млн. т угля)                                                 |
| Замена газообразного топлива           | Хемотермическая передача энергии                | Децентрализованное бытовое и промышленное тепловое снабжение | 1,3—1,6                                                   | 1,6—1,8            | Более экономичны, чем АСТ на расстоянии > 20—30 км | 80—120 (50% децентрализованного теплоснабжения европейской части СССР на перспективу)  |
|                                        | Хемотермическое аккумулирование энергии         | Пиковая электроэнергия                                       | 1,9—2,1                                                   | 2,4—2,6            | Не оценивалась                                     | 32—35 (установленная мощность маневренных АЭС ~ 20 ГВт)                                |

АЭС — атомная энерготехнологическая станция.

Атомные энерготехнологические процессы с ВТГР на основе различных методов разложения воды

Таблица 3

| Технологический процесс        | КПД, % | Производство водорода на АЭС мощностью 3000 МВт (тепл.) |                    | T <sub>макс</sub> , °C |
|--------------------------------|--------|---------------------------------------------------------|--------------------|------------------------|
|                                |        | млрд. м <sup>3</sup> год                                | млн. т усл. т. год |                        |
| Термохимический цикл           | 65—70  | 4—4,5                                                   | 1,6—1,8            | 1225                   |
|                                | 55—60  | 3,5—3,8                                                 | 1,4—1,5            | 925                    |
|                                | 35—40  | 2,2—2,5                                                 | 0,9—1,0            | 800                    |
| Термоэлектрохимический цикл    | 45—50  | 2,9—3,2                                                 | 1,2—1,3            | 800                    |
| Высокотемпературный электролиз | 40—45  | 2,5—2,9                                                 | 1,0—1,2            | 800—900                |

Во всех рассмотренных схемах применения ВТГР в энерготехнологических процессах предусматривается использование части тепла, вырабатываемого реактором, для производства электроэнергии. Благодаря высоким температурам теплоносителя в этом случае могут быть использованы паровые турбины с современными высокими параметрами пара (550 °C и 170/240 бар) и эффективным КПД нетто ~ 40%.

Способность ВТГР вырабатывать тепло более высоких параметров делает их перспективным и для реализации в энергетике АЭС с прямым газотурбинным циклом. Газовые турбины становятся экономически выгодными при 800 °C и выше. В этом случае прямой газотурбинный цикл будет иметь преимущество перед паровым как по высокому КПД, так и в связи с уменьшением металлоемкости оборудования и снижением капитальных затрат. Кроме того,



| Энергетический цикл                                         | КПД, %                                                                                                  | Особенности                                                                                                                                                                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Паротурбинный                                               | 38—40                                                                                                   | Использование серийных паротурбинных блоков, например на 170 бар и на 545 °С. Снижение тепловых сбросов на 30—35 %                                                                                                                                    |
| Замкнутый газотурбинный                                     | 41—44                                                                                                   | Возможность достижения высоких КПД, в том числе при использовании бинарных циклов. Снижение капитальных затрат, повышение маневренности АЭС, возможность применения «сухих» градирен и использования сбросного тепла (до 250+300 °С) для теплофикации |
| Замкнутый газотурбинный с термосорбционным компримированием | 50—55 (с учетом низкопотенциального теплоподвода)<br>80—90 (без учета низкопотенциального теплоподвода) | Высокий КПД, возможность использования «сухих» градирен.<br>Необходим подвод низкопотенциального (100—150 °С) тепла                                                                                                                                   |

преимуществами АЭС прямого цикла являются значительно меньшая потребность в охлаждающей воде и вероятность перехода на воздушное охлаждение, повышение маневренности АЭС и возможности ее использования в регулирующем режиме. Различные варианты применения ВТГР в электроэнергетическом производстве представлены в табл. 4.

Развитие ядерной энергетики должно быть основано на надежном решении проблемы обеспечения топливом. Разработка гелиевой технологии для тепловых ВТГР ускорит решение проблемы газоохлаждаемых реакторов-размножителей [1].

Как отмечал академик А. П. Александров, «... по-видимому, именно развитие высокотемпературных реакторов наравне с реакторами-размножителями станет характерной тенденцией изменения структуры атомной энергетики к 90-м годам нашего века».

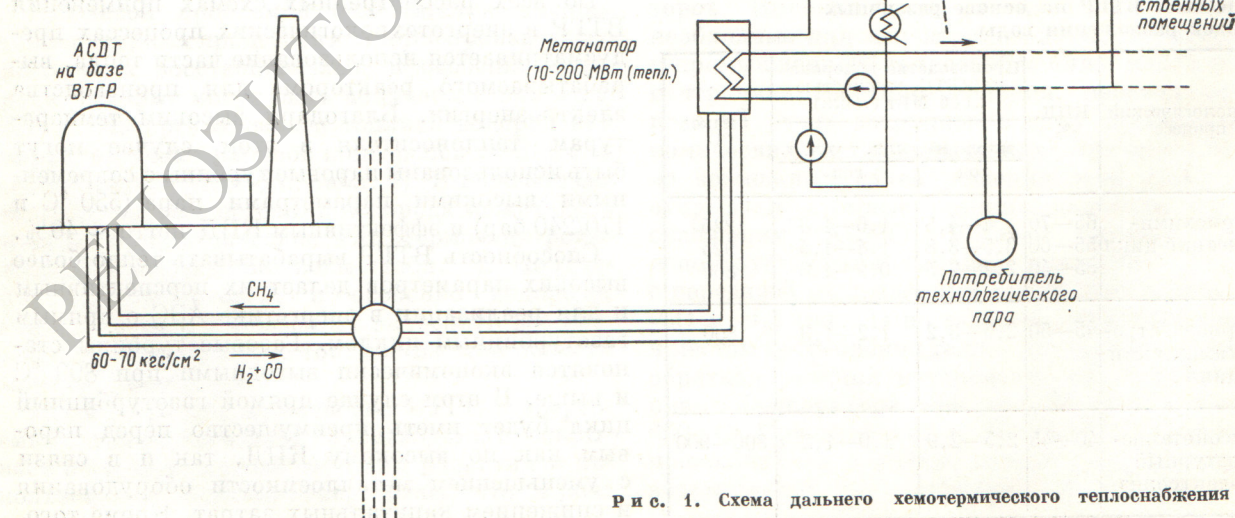


Рис. 1. Схема дальнего хемотермического теплоснабжения



Может случиться, что развитие реакторов-размножителей, охлаждаемых натрием, при времени удвоения делящегося вещества 4—6 лет окажется сложным и невыполнимым, так как заметное смягчение спектра нейтронов натрием снижает коэффициент воспроизводства. В этом случае может оказаться перспективным газо-охлаждаемый реактор, хотя необходимость очень высокой теплонапряженности топлива приведет к высоким давлениям и сложным системам аварийного расхолаживания. Представляется все же, что это направление заслуживает разработки, особенно если учесть, что сокращение времени удвоения делящегося вещества в металлоохлаждаемых реакторах потребует перехода от окисных топливных композиций к более плотным карбидам, нитридам или металлическим композициям, стойкость которых легче обеспечить в химически инертном гелии, чем в натрии» [1].

Одним из отличительных и существенных преимуществ всей концепции ВТГР является общность и однотипность основных технических, технологических и конструктивных решений для всех перечисленных выше направлений развития. Это относится к конструкции твэлов, основному оборудованию, к конструкции корпусов реакторов, конструкционным и теплоизолирующим материалам, системе регулирования и т. д. Такая общность и однотипность основных решений позволяет сократить объемы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ и сроки их выполнения. Это преимущество ВТГР несомненно положительно скажется и при создании производственной базы.

К важным научно-техническим проблемам разработки ВТГР можно отнести разработку конструкции и технологии изготовления топлива, высокотемпературного радиационно- и коррозионностойкого графита, высокотемпературных материалов для оборудования, арматуры, трубопроводов и т. д., теплоизоляционных материалов и конструкций; создание конструкций основного технологического оборудования (теплообменников, газодувок, арматуры, парогенераторов и т. д.) и многополостных корпусов высокого давления из предварительно напряженного железобетона, а также освоение технологии гелия (контроль, очистка, массоперенос и т. д.).

Практически по всем этим проблемам возвращены исследования, которые направлены на достижение характеристик, отвечающих требованиям ВТГР для производства высокопотен-

циального тепла. К реакторам этого назначения предъявляются наиболее высокие требования, и их удовлетворение одновременно решает проблемы и для других реакторов типа ВТГР.

В настоящее время исследуются и разрабатываются многочисленные направления использования ВТГР. С одной стороны, это характеризует широкий интерес к ВТГР как новому энергетическому источнику и, таким образом, способствует развитию данного направления. С другой стороны, применение ВТГР создает проблему поиска развития и оптимальной схемы реакторной установки, предназначенной для различных отраслей народного хозяйства. Большинство существующих проработок атомных энерготехнологических станций (АЭТС) с ВТГР показывает тесную связь между областями применения и конструкцией, схемой и параметрами АЭТС. Из этого следует, что в принципе для каждой области применения (см. табл. 2—4) может быть разработана своя оптимальная конструкция и схема установки. Пока невозможно однозначно выделить из всего этого многообразия применений основные направления, перспективные как с точки зрения потребностей народного хозяйства, так и с точки зрения технической осуществимости и экономичности. Это можно сделать лишь в процессе дальнейших исследований, разработок, накопления опыта эксплуатации и т. д.

Следует оговориться, что отдельные узлы и параметры ВТГР для различных направлений: активная зона, газодувки, приводы СУЗ, входные и выходные параметры по гелию и т. п. могут и должны быть унифицированными. Однако в зависимости от области применения и принятых технических и схемных решений могут существенно отличаться такие важные элементы и параметры установки, как теплообменники, парогенераторы, соотношения между мощностями этих теплообменников и, следовательно,

Основные теплотехнические параметры ВТГР

Таблица 5

| Параметр                  | АЭС с паросило-вым циклом | АЭС с газотурбинной установкой | АЭТС     | АЭС с быстрым гелиевым реактором |
|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|----------|----------------------------------|
| $t_{\text{He макс}}$ , °C | 650—750                   | 800—1000                       | 900—1000 | 600—650 (до 800)                 |
| $t_{\text{He мин}}$ , °C  | 300—350                   | 300—350                        | 300—350  | 250—300                          |
| $p$ , бар                 | 50                        | 50—80                          | 50       | 120—160                          |



гидравлика первого контура, конструкция корпуса из предварительно напряженного железобетона и т. п. Параметры ВТГР различных типов приведены в табл. 5.

Другой проблемой является обеспечение высокой надежности, резервирования, максимального использования мощности реактора. Для ВТГР с шаровыми твэлами, работающих по принципу ОПАЗ (однократное прохождение активной зоны), есть надежды на получение высокого коэффициента использования мощности (КИМ). Например, для экспериментального высокотемпературного реактора AVR, длительно работающего при температуре гелия на выходе  $950^{\circ}\text{C}$ , в последние годы этот коэффициент был равен  $0,85-0,90$ . Тем не менее не следует ожидать, что КИМ у ВТГР будет существенно выше, чем для установок с другими реакторами. По-видимому, следует ориентироваться на КИМ  $0,80-0,95$ .

В то же время в металлургической и химической промышленности эксплуатационные коэффициенты нагрузки приближаются к  $0,95-0,98$ . Многие специалисты этих отраслей считают, что такой нагрузкой должна будет обладать и атомная энергетика, используемая в технологии. Хотя не очевидно, что наиболее экономичное решение для АЭС — такое обеспечение энергией, при котором коэффициент нагрузки технологического производства составит  $0,95-0,98$  (например, за счет увеличения надежности отдельных элементов реактора, дополнительного их резервирования и т. п.), тем не менее существует проблема несоответствия коэффициентов нагрузок для атомных реакторов и некоторых технологических производств.

Достаточно тесно связана с рассмотренным вопросом проблема надежности. Некоторые технологические процессы осуществляются непрерывно. Вынужденная аварийная остановка может привести к таким нарушениям, которые требуют последующих ремонтно-восстановительных работ (например, доменное производство) или после которых необходим длительный пусковой период для выхода на стационарный режим работы. В этом случае к ядерному источнику энергии предъявляется требование об обеспечении высокой надежности питания энергией, т. е. коэффициент эксплуатационной готовности реактора должен быть близок к 1.

В ряде областей применения может возникнуть проблема «разномасштабности». Например, при использовании АЭС для прямого восстановления железной руды производительностью

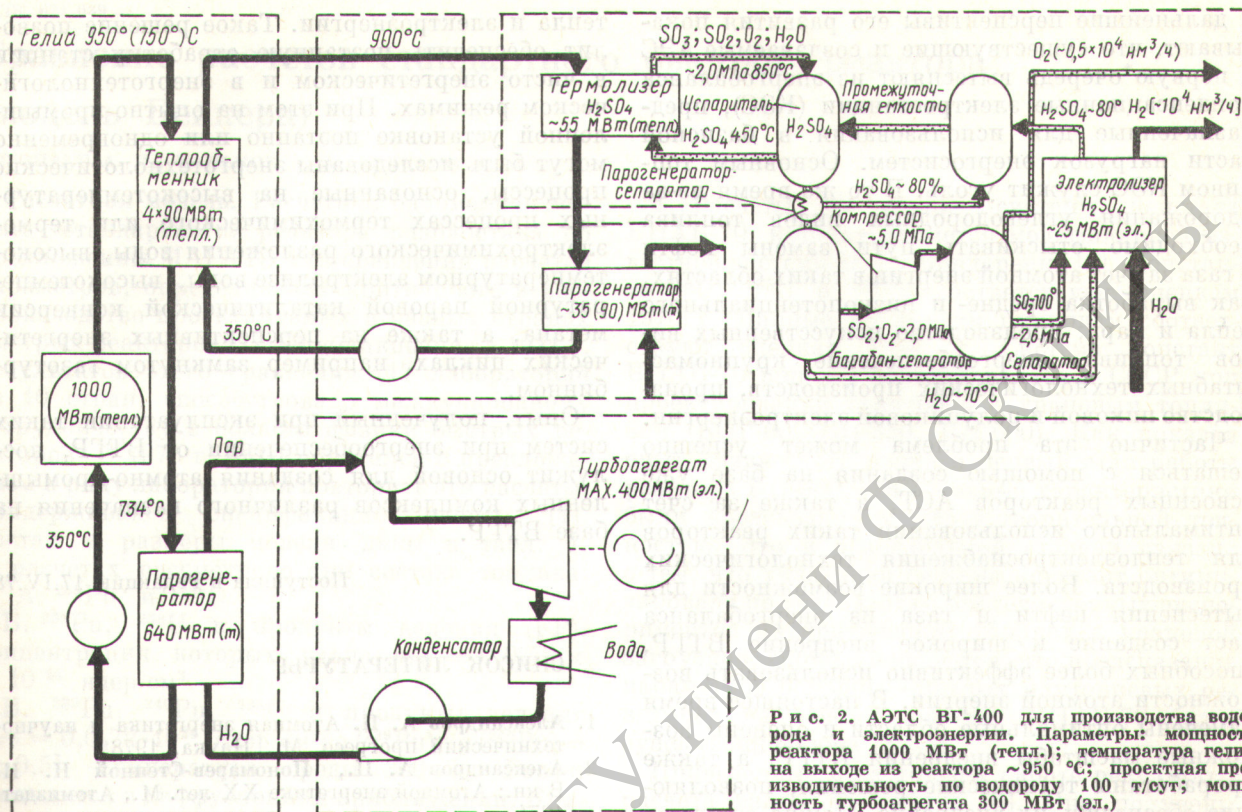
5 млн. т/год требуемая тепловая мощность реактора по технологическому теплу составит  $\sim 1000$  МВт [7]. Таким образом, даже для завода такой большой производительности необходимая тепловая мощность АЭС не попадает в область экономичных мощностей реакторов. С помощью реактора такой же тепловой мощности может вырабатываться  $\sim 2$  млн. т аммиака в год.

В настоящее время невозможно дать однозначные рецепты по решению проблем развития ВТГР. Процесс развития ВТГР от экспериментальных стендовых установок и реакторов до головных промышленных образцов даст ответы на все проблемы. Можно указать только возможные направления исследований и решения, требующие проверки, в том числе: создание максимально унифицированных реакторных установок, подходящих для использования в разных технологических процессах; установок централизованного производства водорода с распределением его различным потребителям; аккумуляторов промежуточных продуктов АЭС (газов различных составов для металлургии, химии); АЭС с несколькими ядерными реакторами средней мощности; разработка режимов поддержания технологических установок в рабочем состоянии с помощью аварийных источников питания.

В настоящее время разрабатывается несколько типов АЭС. Однако наиболее приемлемой является схема установки ВГ-400 (рис. 2) [8, 9], основные отличительные черты которой — комбинированная выработка тепла и электроэнергии, а также использование промежуточного контура для отвода тепла с высоким потенциалом. Каковы же преимущества такой схемы?

Как отмечалось, при выборе в СССР в качестве первоочередного направления развития ВТГР для технологических процессов создание прототипных установок для выработки электроэнергии исключается как самостоятельный этап развития. Тем не менее необходимо последовательно по времени осваивать температуру:  $660-750^{\circ}\text{C}$  и затем  $900-950^{\circ}\text{C}$  [9]. Схема ВГ-400 обеспечивает такую возможность: на первом этапе установка может работать для производства электроэнергии с максимальной температурой в первом контуре до  $750^{\circ}\text{C}$ . При помощи специальных устройств, устанавливаемых вместо теплообменника промежуточного контура, можно проводить испытания при повышенных температурах без обязательного ввода промежуточного и технологических контуров.





Р и с. 2. АЭТС ВГ-400 для производства водорода и электроэнергии. Параметры: мощность реактора 1000 МВт (тепл.); температура гелия на выходе из реактора ~950 °С; проектная производительность по водороду 100 т/сут; мощность турбоагрегата 300 МВт (эл.).

В случае необходимости технологические производства на такой установке можно отнести на последующие этапы с обеспечением работы собственно реакторных устройств при повышенных температурах. Возможен также вариант с использованием и промежуточного контура и специального парогенератора в технологической части с выдачей пара в паротурбинную установку.

Применение на прототипной установке промежуточного контура вносит несколько полезных свойств. Ядерная часть, не учитывающая взрывоопасность, отделяется от технологической цепочки, эксплуатацию которой можно вести практически без учета радиационной опасности. Практически исключается постоянное и аварийное проникновение в первый контур продуктов технологического контура, и в первую очередь водорода [10]. Замена и ремонт опытного технологического оборудования не связаны с принятием мер по его дезактивации. Установка теплообменников возможна после отработки собственно реактора; при этом упрощается их замена при эксплуатации.

Использование в ВГ-400 нескольких петель первого контура даст возможность исследовать в них различные технологические процессы. Если мощности головных промышленных установок такого типа находятся в интервале 3000—5000 МВт (тепл.), то мощность прототипной установки 1000 МВт составит 20—30%, что можно считать оптимальным значением. Установка ВГ-400, как одна из первых прототипных АЭТС, позволит изучать и решать перечисленные выше проблемы технического характера, так и проблемы, связанные с внедрением концепции высокотемпературной ядерной энергетики.

**Выводы.** Более чем двадцатилетнее развитие ядерной энергетики в СССР привело к широкому внедрению АЭС в электроэнергетику страны и их роль будет все более возрастать. На базе реакторов ВВЭР и РБМК освоены мощные энергоблоки с высокими технико-экономическими показателями, которые позволяют существенно уменьшить дефицит энергоресурсов в европейской части СССР. Сложившаяся в настоящее время структура энергобаланса страны



и дальнейшие перспективы его развития показывают, что существующие и создаваемые АЭС в первую очередь вытесняют из энергобаланса конденсационные электростанции (КЭС), предназначенные для использования в базисной части нагрузок энергосистем. Основным топливом КЭС служит уголь. В то же время из-за удорожания углеводородных видов топлива необходимо отыскивать пути замены нефти и газа за счет атомной энергии в таких областях, как выработка средне- и низкопотенциального тепла и пара, производство искусственных видов топлива, энергообеспечение крупномасштабных технологических производств, производство пиковой и полупиковой электроэнергии.

Частично эта проблема может успешно решаться с помощью создания на базе уже освоенных реакторов АСТ, а также за счет оптимального использования таких реакторов для теплоэлектроснабжения технологических производств. Более широкие возможности для вытеснения нефти и газа из энергобаланса даст создание и широкое внедрение ВТГР, способных более эффективно использовать возможности атомной энергии. В настоящее время намечены оптимальные области и оценены возможные масштабы внедрения ВТГР, а также проработаны технические решения, позволяющие обеспечить их внедрение. Можно ожидать, что около двух третей потенциальной области применения атомных высокотемпературных источников тепла может быть освоена ВТГР, причем со значительным народнохозяйственным эффектом. В связи с этим необходимо форсировать работы этого направления с целью ускорить создание первых промышленных АЭС.

Основная задача первого этапа — создание опытно-промышленной АЭС с ВТГР мощностью 1000 МВт (тепл.) и температурой гелия на выходе из активной зоны  $\sim 950^\circ\text{C}$ . На опытно-промышленной, а в некоторых случаях и на промышленных АЭС целесообразно комплексно использовать энергию ВТГР для комбинированной выработки высокопотенциального

тепла и электроэнергии. Такое решение позволит обеспечить поэтапную отработку станции в чисто энергетическом и в энерготехнологическом режимах. При этом на опытно-промышленной установке поэтапно или одновременно могут быть исследованы энерготехнологические процессы, основанные на высокотемпературных процессах термохимического или термоэлектрохимического разложения воды, высокотемпературном электролизе воды, высокотемпературной паровой каталитической конверсии метана, а также на перспективных энергетических циклах, например замкнутом газотурбинном.

Опыт, полученный при эксплуатации таких систем при энергообеспечении от ВТГР, послужит основой для создания атомно-промышленных комплексов различного назначения на базе ВТГР.

Поступила в Редакцию 17.IV.78

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А. П. Атомная энергетика и научно-технический прогресс. М., Наука, 1978.
2. Александров А. П., Пономарев-Степной Н. Н. В кн.: Атомной энергетике XX лет. М., Атомиздат, 1974.
3. Легасов В. А. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. Вып. 1. М., изд. ИАЭ, 1976.
4. Гребеник В. Н. и др. Перспективы применения ВТГР в энерготехнологических процессах. Vienna IAEA-TC-109/2, 1977.
5. Мелентьев Л. А. «Теплоэнергетика», 1974, № 11, с. 8.
6. Энергетика СССР в 1976—1980 гг. Под ред. А. М. Некрасова и М. Г. Первухина. М., «Энергия», 1977.
7. Пономарев-Степной Н. Н. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. Вып. 1. М., изд. ИАЭ, 1976.
8. Состояние и перспективы развития работ по ВТГР в СССР, Vienna, IAEA-TC-109/3, 1977.
9. Митенков Ф. М. и др. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. Вып. 2 (3). М., изд. ИАЭ, 1977.
10. Проценко А. Н., Столяревский А. Я. В кн.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика. Вып. 1 (2). М., изд. ИАЭ, 1977.