

Применение высокотемпературных модульных гелиевых реакторов для теплоснабжения энергоемких производств

Д.т.н. А.Я. Столяревский, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт», директор «Центра КОРТЭС», г. Москва; к.т.н. Н.Г. Кодочигов, главный конструктор, А.В. Васяев, начальник отдела, д.т.н. В.Ф. Головкин, главный специалист, М.Е. Ганин, ведущий инженер-конструктор, ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

1. Введение

Рост мировых потребностей в топливе и энергии при ресурсных и экологических ограничениях традиционной энергетики делает актуальной своевременную подготовку новой энергетической технологии, способной взять на себя существенную часть прироста энергетических нужд, стабилизируя потребление органического топлива. Энергетическая стратегия России на период до 2020 года определяет коммунальное теплоснабжение как наиболее социально значимый и топливоемкий сектор экономики. Востребованность атомных энергоисточников в сферах электрогенерации и бытового теплоснабжения обусловлена ростом стоимости органического топлива и увеличением энергопотребления. Ключевыми факторами при создании ядерных энергоблоков являются высокая безопасность энергоустановок и их коммерческая привлекательность. «Стратегия развития атомной энергетики России до 2030 года и на период до 2050 года», одобренная Правительством Российской Федерации предусматривает к 2020 году выработку тепла атомными энергоисточниками до 30 млн.Гкал/год с годовым замещением потребления до 24 млрд.м³ газа [1]. Создание и внедрение атомных станций в секторе теплоснабжения позволит создать новые генерирующие мощности и обеспечить экономию природного газа для экспорта за границу, что является фактором геополитического значения.

Однако даже крупномасштабное внедрение атомной энергии в сферу электрической генерации и коммунального теплоснабжения не решает проблему растущего спроса на моторное топливо и промышленное тепло. Долгосрочный сценарий развития атомной энергетики до 2050 года предусматривает замещение органического топлива не только в коммунальном секторе, но и в энергоемких отраслях промышленности за счет расширения сферы применения атомной энергии для производства водорода, технологического тепла, синтетического топлива [2]. Необходимость массового использования новых энергетических технологий определяется качественным изменением экологических требований в энергетической сфере и на транспорте [3].

Потенциал внедрения атомной энергии в «неэлектрической» сфере определяется объемами энергопотребления технологического тепла промышленностью и не уступает по масштабам электроэнергетике. В сфере обрабатывающих производств лидерами по потреблению тепловой энергии являются химическая промышленность, нефтепереработка, металлургия (таблица 1).

Таблица 1. Потребление тепла обрабатывающими производствами (2007 г.) [4]

Вид производства	Млн ГДж	Млн Гкал	%
Пищевая промышленность	206,4	49,3	10,8
Легкая промышленность	26,8	6,4	1,4
Деревопереработка	46,5	11,1	2,4
Производство кокса	12,1	2,9	0,6
Производство	268,8	64,2	14,1

Вид производства	Млн ГДж	Млн Гкал	%
нефтепродуктов			
Химическое производство	492,8	117,7	25,8
Производство неметаллических изделий	83,7	20,0	4,4
Металлургическое производство	300,2	71,7	15,7
Машиностроение	181,3	43,3	9,5
Прочие	291,8	69,7	15,3
Всего	1910,4	456,3	100

Таким образом, внедрение ядерных технологий в теплоснабжение промышленных процессов является актуальной задачей, которая еще требует своего решения.

Единственной на сегодняшний день ядерной технологией, реально способной наиболее полно решить задачу замещения органического топлива в промышленном теплоснабжении и транспорте, является технология высокотемпературных модульных гелиевых реакторов (МГР).

Преимущества МГР определяются следующими факторами:

- возможностью нагрева теплоносителя на выходе из активной зоны до температуры 1000 °С, что расширяет сферу применения ядерной энергии не только для производства электроэнергии и коммунального тепла, но и для технологических целей, включая производство водорода;

- возможностью использования различных схем энергоблока: с газотурбинным циклом, с паротурбинным циклом, с контуром передачи высокотемпературного тепла к технологическим производствам;

- пассивным принципом отвода остаточного тепла, обеспечивающим высокий уровень безопасности, в том числе при полной потере теплоносителя первого контура;

- обеспечением режима нераспространения делящихся материалов, которое основано на свойствах керамического микро топлива;

- низким тепловым воздействием на окружающую среду благодаря возможности реализации эффективных термодинамических циклов преобразования тепловой энергии в электричество (в прямом газотурбинном цикле Брайтона КПД преобразования энергии может достигать 50 % и выше);

- возможностью комбинированной выработки электроэнергии и тепла;

- минимальным количеством систем и компонентов реакторной установки (РУ) и станции при использовании газотурбинного цикла в первом контуре, создающие предпосылки для снижения капитальных и эксплуатационных затрат;

- возможностью модульного исполнения блока с широким диапазоном мощности модуля (от 200 до 600 МВт) и варьированием мощности АС набором модулей;

2. Конструктивные решения энергоисточников для промышленного теплоснабжения

Исходя из прогнозных исследований развития и потребностей энергетического рынка, выполнены предконцептуальные проработки прототипной коммерческой РУ МГР [5] с унифицированным модульным гелиевым реактором тепловой мощностью ~200 МВт и на ее основе ряда энергоисточников для различного энерготехнологического применения.

Проектной основой для этих разработок послужили мировой опыт создания экспериментальных установок с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором (ВТГР), опыт разработки в России (более 40 лет) проектов РУ с ВТГР различного уровня мощности (от 100 до 1000 МВт) и назначения.

Также использовались результаты разработок проекта реакторной установки ГТ-МГР [6] с модульным гелиевым реактором, выполняемого в рамках российско-американской программы.

В рамках проработок были рассмотрены несколько вариантов МГР для энерготехнологического назначения:

- для производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения, с преобразованием тепловой энергии активной зоны в электрическую в прямом газотурбинном (ГТ) цикле Брайтона – МГР-100 ГТ;

- для производства электроэнергии и водорода методом высокотемпературного электролиза пара (ВЭП) – МГР-100 ВЭП;

- для производства водорода методом паровой конверсии метана (ПКМ) – МГР-100 ПКМ;

- для высокотемпературного теплоснабжения нефтехимического производства (НП) – МГР-100 НП.

Каждый вариант установки МГР-100 состоит из энергетической и технологической частей.

Энергетическая часть максимально унифицирована для всех вариантов и представляет собой энергоблок, включающий реактор и, в зависимости от назначения, газотурбинный блок преобразования энергии (БПЭ), предназначенный для производства электроэнергии, и (или) блоки теплообменного оборудования.

Технологическая часть МГР-100, в зависимости от назначения, представляет собой или технологическую установку по производству водорода или контуры высокотемпературного теплоснабжения, снабжающие теплом различные технологические процессы.

Основными критериями при выборе технических решений являлись обеспечение высоких технико-экономических показателей в части выработки электроэнергии и высокопотенциального тепла, минимизация воздействия на обслуживающий персонал, население и окружающую среду, исключение радиоактивного загрязнения технологического продукта.

В основу конфигурации энергоисточника положены следующие принципы.

Мощность реактора и его конструкция универсальны для всех вариантов энергоисточника, различаются только параметры теплоносителя. Выбор уровня мощности РУ (215 МВт) определялся:

- потребностями электроэнергетики и коммунального теплоснабжения;

- потребностями промышленных предприятий в высоко- и среднетемпературном теплоснабжении технологических процессов;

- технологическими возможностями отечественных предприятий по изготовлению основного оборудования РУ, включая корпуса.

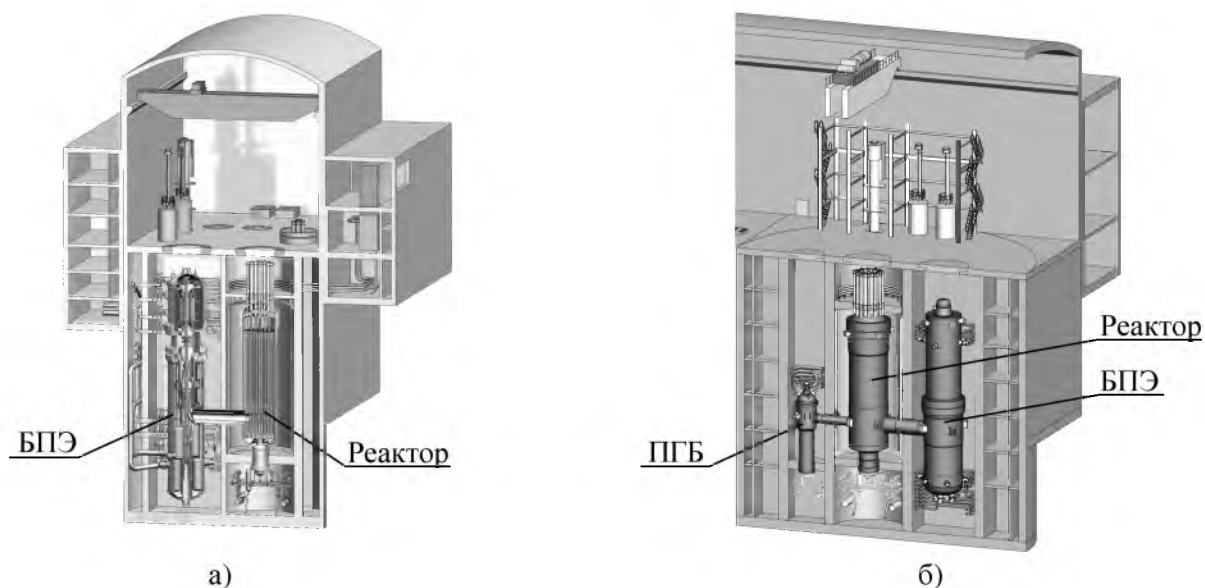
Реактор – модульный с активной зоной, состоящей из шестигранных призматических ТВС, с гелиевым теплоносителем, обладающий свойствами внутренней самозащищенности. Безопасность обеспечивается за счёт использования пассивных принципов действия систем. Остаточные тепловыделения и аккумулированное тепло отводятся от активной зоны через корпус реактора к системе охлаждения шахты реактора и далее в атмосферу с помощью естественных физических процессов теплопроводности, излучения, конвекции без превышения пределов безопасной эксплуатации топлива, в том числе и в авариях с полной потерей теплоносителя первого контура, при отказе всех активных средств циркуляции и источников энергоснабжения.

Циркуляция теплоносителя в петлях первого контура осуществляется главной циркуляционной газодувкой (ГЦГ) или компрессорами турбомашин БПЭ.

Компоновка всех рассматриваемых вариантов МГР-100 выполнена с учетом требований безопасной эксплуатации реакторной установки при всех возможных на АС авариях. Каждая РУ размещается в главном здании АС, состоящем из наземной части, являющейся зданием техобслуживания и перегрузки реактора (центральным залом) и подземного контейнента (защитной оболочки РУ) низкого давления, расположенного под центральным залом.

В контейненте размещаются энергетическое оборудование реакторной установки и оборудование основных систем, важных для безопасности. Контейнент выполнен из монолитного железобетона, герметичный, с внутренними размерами: диаметр 35 м, высота не более 35 м, способен при разгерметизации первого контура РУ и/или трубопроводов второго контура выдержать внутреннее давление среды до 0,5 МПа. Контейнент обеспечивает оптимальное использование площадей и объемов помещений, высокую компактность размещения оборудования, облегчение операций по замене оборудования и перегрузке топлива, герметичность по отношению к смежным помещениям главного здания АС и окружающей среде, отвод тепла в грунт в запроектных авариях.

Конструкция оборудования первого контура имеет блочное исполнение. Основное энергетическое оборудование МГР-100 размещается в стальном блоке корпусов, который состоит из вертикального корпуса реактора, одного-трех вертикальных корпусов БПЭ и теплообменного оборудования и одного-трех горизонтальных соединительных корпусов, связывающих вертикальные корпуса в единый корпус высокого давления (Рис. 1). Корпуса основного оборудования по своим размерам аналогичны корпусу реактора ВВЭР. Особое внимание уделено минимизации количества внешних трубопроводов первого контура.



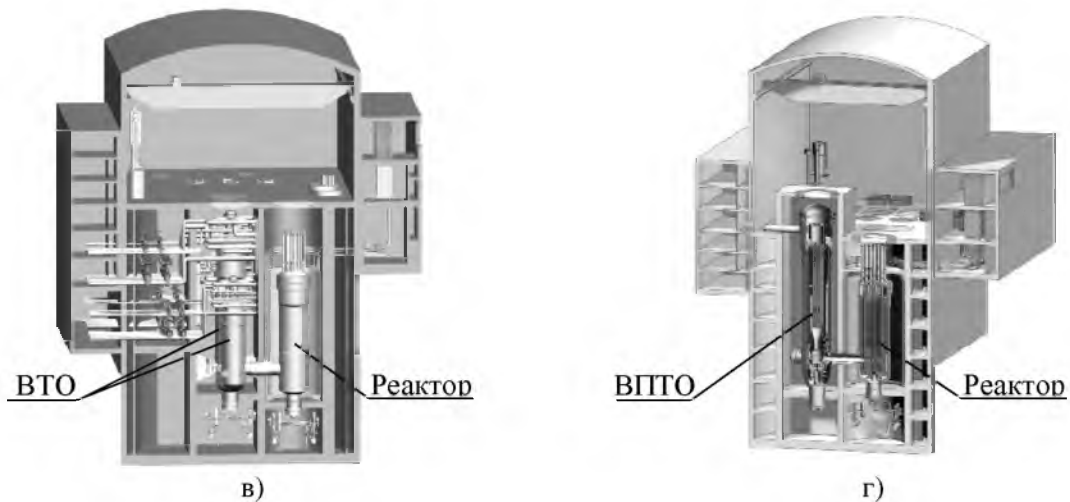


Рис.1. Компоновка реакторных установок: а) МГР-100 ГТ; б) МГР-100 ВЭП; в) МГР-100 ПКМ; г) МГР-100 НПЗ

В вариантах энергоисточников для МГР-100 ГТ и МГР-100 ВЭП (Рис. 2,3) предусматривается применение унифицированного газотурбинного БПЭ. Центральное место в БПЭ занимает турбомашина (ТМ), представляющая собой агрегат вертикального исполнения, состоящий из турбокомпрессора (ТК) и генератора, роторы которых имеют различную частоту вращения – 9000 об/мин и 3000 об/мин, соответственно. В качестве основных опор применены электромагнитные подшипники. Генератор размещен вне контура циркуляции гелия в среде воздуха. Предварительный и промежуточный холодильники БПЭ размещены вокруг ТК. Рекуператор расположен в верхней части корпуса выше оси горячего газохода. Сбросное тепло отводится от первого контура в предварительном и промежуточном холодильниках БПЭ системой охлаждающей воды и далее к атмосферному воздуху в сухих вентиляторных градирнях. Возможно рассмотреть вариант использования сбросного тепла для отопительных нужд и горячего водоснабжения.

Блоки теплообменников предназначены для передачи тепловой энергии от реактора потребителю в энерготехнологические производства. В зависимости от рабочей среды, типа процесса и вероятности попадания радиоактивности в продукт технологического производства и загрязнения радиоактивными продуктами оборудования, может применяться двух- или трехконтурная схема РУ.

Так, в АС для производства водорода методом высокотемпературного электролиза пара (МГР-100 ВЭП) и методом паровой конверсии метана (МГР-100 ПКМ) применена двухконтурная схема. В этих процессах основным компонентом технологической среды является водяной пар. Проведенный анализ показывает, что при возможных аварийных ситуациях с разгерметизацией парогенератора или высокотемпературного теплообменника эффекты поступления водородосодержащих продуктов в реактор надежно регулируются системами управления и защиты реактора.

Вариант энергоисточника для снабжения теплом нефтехимического производства (МГР-100 НП) предусматривает трехконтурную тепловую схему. Передача тепла от РУ потребителю осуществляется через высокотемпературный промежуточный теплообменник "гелий-гелий" и промежуточный гелиевый контур, и далее к сетевому контуру НП. Такое решение ограничивает выход радиоактивности в сетевой контур, обеспечивая радиационную чистоту технологического продукта, а также минимальное загрязнение первого контура технологическими примесями.

Основными техническими мерами, направленными на исключение потенциальной опасности попадания радиоактивности в продукт технологического производства, являются создание и поддержание гарантированного перепада давления (~0,5 МПа), направленного в сторону первого контура, а для варианта МГР-100 НП еще и введение промежуточного контура. Эксплуатационные протечки гелия из промежуточного контура в первый контур не оказывают отрицательного воздействия на РУ.

2.1 Энергоисточник МГР-100 ГТ для производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения

Энергоисточник МГР-100 ГТ предназначен для производства электроэнергии в прямом газотурбинном цикле. Высокая температура сбросного тепла газотурбинного цикла (более 100 °С) позволяет использовать его для горячего водоснабжения и теплоснабжения. В климатических условиях России такая функциональная возможность имеет большое значение. Свидетельством тому являются данные по годовому расходу природного газа на производство электроэнергии и тепла, которые составляют ~ 135 и 200 млрд. м³, соответственно.

МГР-100 ГТ может эксплуатироваться в двух режимах: в режиме только производства электроэнергии и в комбинированном режиме производства электроэнергии и коммунального теплоснабжения за счет утилизации сбросного тепла. Таким образом, кроме более высокого КПД производства электроэнергии, МГР-100 ГТ предоставляет потенциальную возможность получить коэффициент использования тепла около 99 %.

При работе установки в комбинированном режиме сбросное тепло отводится к теплоносителю сетевого контура в сетевых теплообменниках. В режиме производства только электроэнергии сетевой контур отключен, и сбросное тепло отводится к атмосферному воздуху в сухих вентиляторных градирнях.

Принципиальная схема МГР-100 ГТ представлена на Рис. 2. Требуемая температура подводимой к потребителю сетевой воды (150 °С) обеспечивается за счет уменьшения расхода и повышения давления в контуре охлаждающей воды БПЭ. Чтобы не допустить в комбинированном режиме повышения температуры гелия на входе в рекуператор сверх допустимых пределов (600 °С), организована байпасная ветка с регулируемым перепуском гелия первого контура помимо рекуператора по стороне ВД (с выхода КВД на выход рекуператора по стороне ВД).

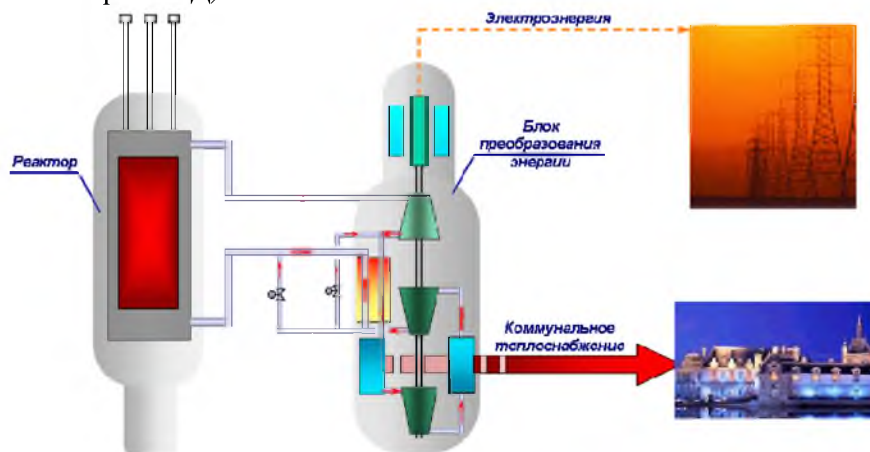


Рис.2. Принципиальная схема МГР-100 ГТ

Основные параметры МГР-100 ГТ в режиме выдачи электроэнергии и коммунального теплоснабжения приведены в таблице 2. В комбинированном режиме электрическая мощность установки составит 57 МВт, тепловая мощность, отводимая сетевой водой, 154 МВт.

Таблица 2. Основные параметры МГР-100 ГТ

Наименование параметра	Значение	
	Режим выработки электроэнергии	Комбинированный режим
Тепловая мощность реактора, МВт	215	215
КПД выработки электроэнергии (нетто), %	46,1	25,4
Температура гелия на входе/выходе реактора, °С	558 / 850	490 / 795
Температура гелия низкого	583	595

Таблица 2. Основные параметры МГР-100 ГТ

	Значение	
давления на входе в рекуператор, °С		
Расход гелия через реактор, кг/с	139,1	134
Расход гелия через байпас с выхода КВД на выход рекуператора по стороне высокого давления, кг/с	-	32,2
Давление гелия на входе в реактор, МПа	4,91	4,93
Степень расширения в турбине	2,09	1,77
Частота вращения генератора/ТК, об/мин	3000/9000	3000/9000
Расход охлаждающей воды БПЭ, кг/с	804	480
Температура сетевой воды на входе/выходе, °С	-	70 / 145

Себестоимость вырабатываемой электроэнергии с учетом полезного использования сбросного тепла для целей бытового теплоснабжения практически снижается в два раза, по сравнению с вариантом работы только в режиме выработки электроэнергии. При этом следует учитывать экономический эффект от исключения тепловых выбросов в окружающую среду.

2.2 Энергоисточники МГР-100 ВЭП и МГР-100 ПКМ для производства водорода

Переход к водородной экономике основывается, в том числе, на создании технологии использования энергии ВТГР в процессах производства водорода, имеющих высокую термодинамическую и технико-экономическую эффективность. Эти процессы, по возможности, должны исключать потребление органического топлива, прежде всего нефти и газа, которые имеют ограниченные запасы и являются ценным сырьем для промышленности. К таким процессам относится получение водорода из воды с помощью следующих основных способов: электролиз, термохимическое разложение и высокотемпературный электролиз пара. Их стоимость не зависит от постоянно возрастающих цен на нефть и газ, в отличие, например, от получения водорода из метана. В то же время для первого этапа освоения водородной энергетики, при еще относительно низких ценах на газ, рассматриваются процессы получения водорода из метана. Анализ требований к эффективности производства потребляемой энергии и уровню температуры тепла позволяет сформулировать требования к ВТГР как к источнику энергии, основными из которых являются:

- производство высокопотенциального тепла до 950 °С;
- отсутствие загрязнения водорода радиоактивными веществами или их приемлемо низкий уровень;
- низкая стоимость производства водорода по сравнению с традиционными способами;
- высокий уровень безопасности энерготехнологического комплекса.

В качестве основных процессов производства водорода на этапе концептуальных проработок МГР-100 рассматриваются:

- высокотемпературный электролиз воды;
- паровая конверсия природного газа (метана).

Таблица 3. Основные параметры МГР-100 ВЭП

Наименование параметра	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	215
Полезная электрическая мощность генератора, МВт	87,1
КПД выработки электроэнергии (нетто), %	45,7
Температура гелия на входе/выходе реактора, °С	553 / 850
Расход гелия через реактор, кг/с	138
Давление гелия на входе в реактор, МПа	4,41
Степень расширения в турбине	2,09
Частота вращения генератора/ ТК, об/мин	3000/ 9000
Расход гелия через турбину, кг/с	126
Температура гелия на входе/выходе БПЭ, °С	850 / 558
Мощность ПГ, МВт	22,3

Таблица 3. Основные параметры МГР-100 ВЭП

Наименование параметра	Значение
Расход гелия через ПГ, кг/с	12,1
Температура гелия на входе/выходе ПГ, °С	850 / 494
Паропроизводительность, кг/с	6,46
Давление пара на выходе ПГ, МПа	4,82

Принципиальная схема **МГР-100 ВЭП** для производства электроэнергии и перегретого пара требуемых параметров с целью получения водорода методом высокотемпературного электролиза представлена на Рис. 3.

За основу для варианта МГР-100 ВЭП принята конфигурация РУ с параллельной схемой расположения петель теплообмена в первом контуре. Одна петля включает реактор, парогенерирующий блок и ГЦГ. Другая - реактор и БПЭ. Таким образом, часть тепловой энергии (~10 %), вырабатываемой в активной зоне реактора, передается в ПГБ для нужд водородного производства, остальная часть преобразуется в БПЭ в электрическую энергию в прямом газотурбинном цикле.

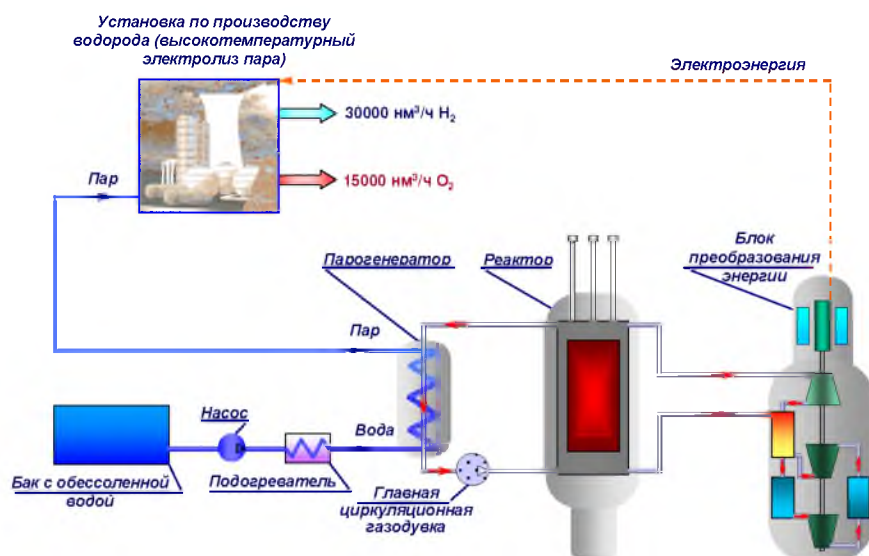


Рис. 3. Принципиальная схема МГР-100 ВЭП

Основные параметры установки приведены в таблице 3. Температура гелия на выходе из реактора составляет 850 °С, что не превышает соответствующей температуры в прототипной РУ ГТ-МГР. Второй контур предназначен для производства перегретого пара в парогенераторе (Рис. 4).

Циркуляция гелия в ПГБ осуществляется главной циркуляционной газодувкой. Подвод воды и отвод пара производится через крышку ПГ. Перегретый до требуемых параметров пар отводится по трубопроводам в установку высокотемпературного электролиза на твердооксидных электрохимических элементах, в которой водяной пар разлагается на водород и кислород с разделением этих реагентов. Установка ВЭП снабжается электроэнергией, вырабатываемой генератором БПЭ.

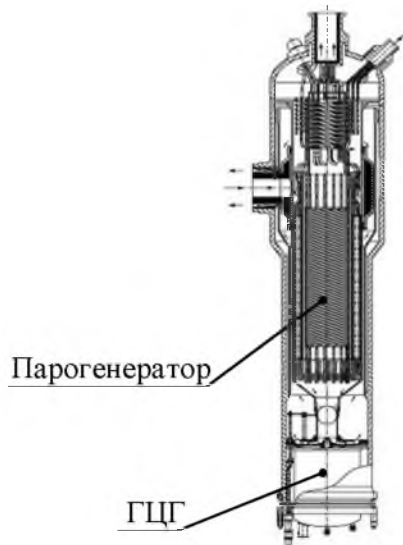


Рис.4. Парогенерирующий блок

Экономическая эффективность внедрения ПКМ определяется ценой на газ и температурой потребляемого тепла. Требуемая температура нагрева парогазовой смеси должна быть не ниже 800 С, причем дальнейшее повышение температуры на эффективность процесса практически не влияет.

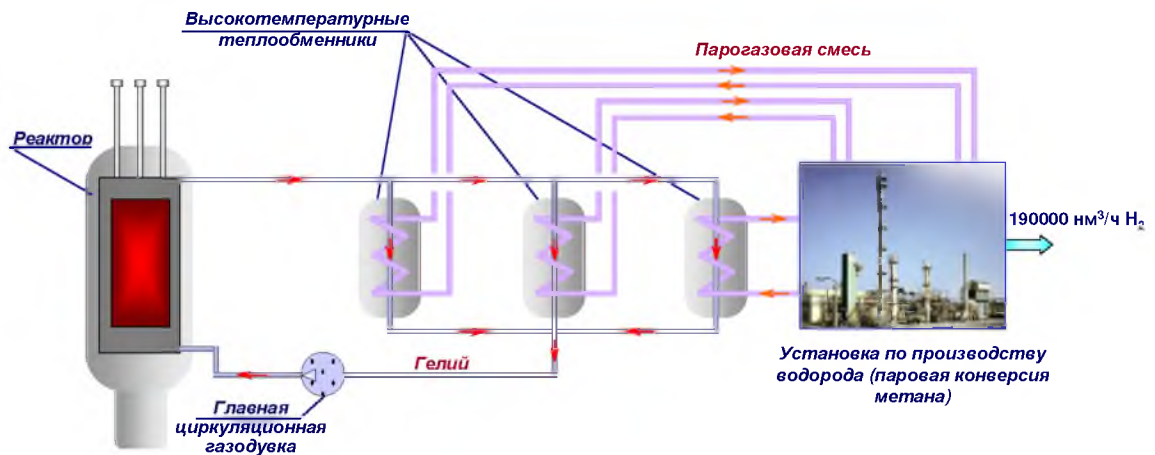


Рис.5. Принципиальная схема МГР-100 ПКМ

Тепловая энергия отводится от реактора к рабочей среде второго контура (парогазовой смеси) в высокотемпературных теплообменниках (ВТО), которые являются составной частью термоконверсионного аппарата (ТКА).

Реализация конверсии метана ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}(\text{пар}) + \text{тепло} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$) происходит в ТКА по трехступенчатой схеме. Парогазовая смесь (пар - 83,5 %, CH_4 - 16,5 %) подается последовательно в три ступени - ТКА1, ТКА2 и ТКА3. Это и определяет конфигурацию теплопередающего блока РУ.

Он состоит из трех отдельных высокотемпературных теплообменников ВТО 1, ВТО 2, ВТО 3 (Рис.6), представляющих отдельные ступени (секции) блока. Расположение секций ВТО по ходу теплоносителя первого контура – параллельное, по ходу парогазовой смеси – последовательное.

Принципиальная схема МГР-100 ПКМ для выработки высокопотенциального тепла с целью получения водорода методом паровой конверсии метана представлена на Рис.5.

Паровая конверсия метана является на сегодня основным промышленно освоенным и приспособленным для первого этапа внедрения технологий производства водорода (совместно с ВТГР) процессом.

На нем основано существующее мировое производство водорода. Сочетание ВТГР и ПКМ позволяет примерно на 40 % снизить потребление природного газа, а следовательно, и затраты, необходимые для производства водорода.

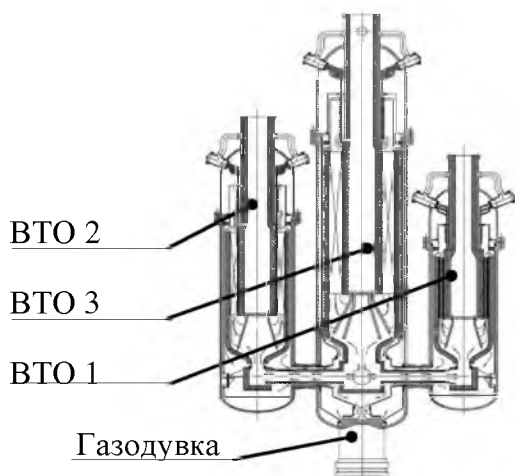


Рис.6. Высокотемпературный теплообменник

После ТКА-3 парогазовая смесь (пар-55 %, CH_4 , H_2 , CO , CO_2 – 45 %) с большой концентрацией водорода последовательно проходит блок очистки от CO_2 и H_2O и направляется в блок отделения водорода. Возвратная фракция и природный газ смешиваются с перегретым паром и затем направляются в ТКА. Циркуляция гелия в первом контуре осуществляется ГЦГ, парогазовой смеси – компрессорами.

Основные параметры установки приведены в таблице 4. Температура гелия на выходе из реактора составляет 950 °С.

Таблица 4. Основные параметры МГР-100 ПКМ

Наименование параметра	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	215
Температура гелия на входе/ выходе реактора, °С	450 / 950
Расход гелия через реактор, кг/с	81,7
Давление гелия на входе в реактор, МПа	5,0
Давление парогазовой смеси на входе теплообменников, МПа	5,3
ВТО-ТКА1	
Мощность теплообменника, МВт	31,8
Расход гелия/ парогазовой смеси, кг/с	12,1 / 43,5
Температура парогазовой смеси на входе/ выходе, °С	350 / 650
ВТО-ТКА2	
Мощность теплообменника, МВт	58,5
Расход гелия/ парогазовой смеси, кг/с	22,2 / 60,9
Температура парогазовой смеси на входе/ выходе, °С	350 / 750
ВТО-ТКА3	
Мощность теплообменника, МВт	125
Расход гелия/ парогазовой смеси, кг/с	47,4 / 101
Температура парогазовой смеси на входе/ выходе, °С	350 / 870

В зависимости от типа компоновки (петлевая или блочная) основного оборудования РУ, конфигурация теплопередающего блока может быть различной.

В блочной компоновке основное оборудование РУ соединяется с помощью коротких патрубков типа "труба в трубе", в состав теплопередающего блока целесообразно включить также и ГЦГ.

2.3 Энергоисточник МГР-100 НПЗ для нефтехимического производства

МГР-100 НПЗ предназначена для выработки высокопотенциального или среднеспотенциального тепла с целью обеспечения технологических нужд нефтехимического производства (нагрев сетевых теплоносителей), что позволит сэкономить около 14 % перерабатываемой нефти. Проектной базой для нее послужил разработанный в России в 80-е годы эскизный проект модульного реактора с активной зоной из шаровых твэлов и температурой гелия на выходе 750 °С.

Проект был ориентирован на выработку тепла для технологических процессов на основе требований типового нефтеперерабатывающего завода.

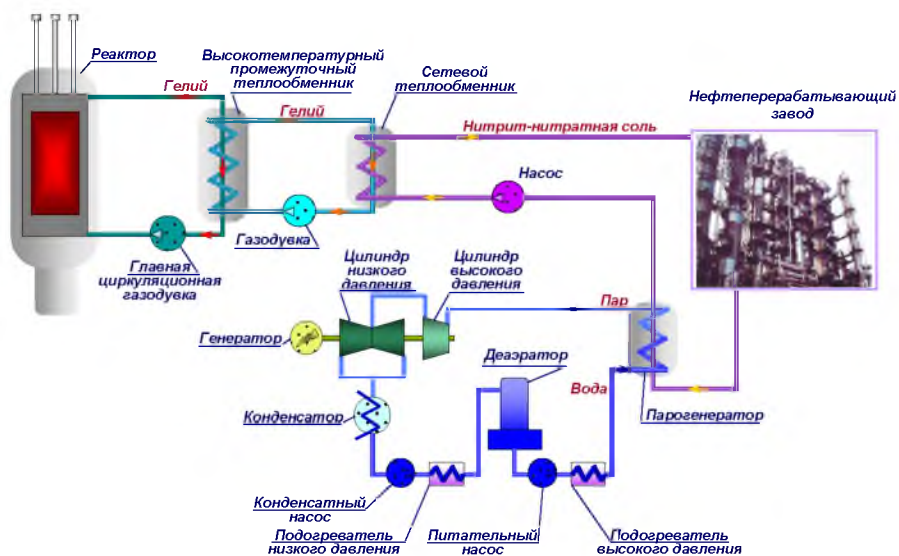


Рис.7. Принципиальная схема МГР-100 НПЗ

Принципиальная схема МГР-100 НПЗ представлена на Рис.7. Циркуляция гелия в первом и втором контурах – принудительная и осуществляется циркуляционными газодувками. Рабочей средой сетевого контура является нитрит-нитратная соль. Основные параметры установки приведены в таблице 5.

Таблица 5. Основные параметры МГР-100 НПЗ

Наименование параметра	Значение
Тепловая мощность реактора, МВт	215
Температура гелия на входе/ выходе реактора, °С	300 / 750
Расход гелия через реактор, кг/с	91,5
Давление гелия на входе в реактор, МПа	5,0

Таблица 5. Основные параметры МГР-100 НПЗ

Наименование параметра	Значение
Мощность ПТО, МВт	217
Расход гелия первого/второго контура через ПТО, кг/с	91,5 / 113
Температура гелия первого контура на входе/ выходе ПТО, °С	750 / 294
Температура гелия второго контура на входе/ выходе ПТО, °С	230 / 600
Давление гелия второго контура на входе ПТО, МПа	5,50

Основными потребителями тепла НПЗ (~50 % от тепловой мощности реактора) являются трубчатые печи, предназначенные для термокаталитической переработки нефти.

По уровню нагрева нефтепродуктов в печах процессы нефтепереработки делятся на три типа: низкотемпературные (до 400 °С), среднетемпературные (до 550 °С) и высокотемпературные (до 900 °С).

Тепло от РУ МГР-100 НПЗ используется также и для покрытия потребностей НПЗ в технологическом паре (~35 % от тепловой мощности реактора) и электроэнергии (~15 % от тепловой мощности реактора).

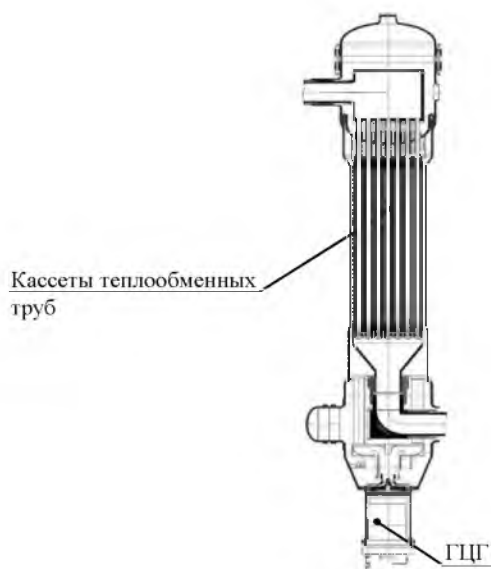


Рис.8. Промежуточный теплообменник

Теплопередающий блок состоит из промежуточного теплообменника (ПТО), ГЦГ, внутрикорпусных металлоконструкций (ВКМ).

ПТО (Рис.8) состоит из трубной системы, комплекта каналов (37 шт), собирающей камеры "горячего" гелия промежуточного контура, элементов их крепления и герметизации. Главная циркуляционная газодувка смонтирована в нижней части корпуса ПТО.

3 Проблемные вопросы

В рамках выполненных проектов разработаны схемная конфигурация и 3-D компоновка установок, определены параметры контуров и характеристики основного оборудования, проведены расчётное обоснование основных компонентов конструкции, анализ эксплуатационных и аварийных режимов, предварительный анализ стоимости создания и строительства РУ, определены этапы и планы НИОКР. Большая часть требуемых НИОКР, в том числе по реактору, турбомашине и ее компонентам, рекуператору, предварительному и промежуточному холодильникам, ВКМ, проводятся в настоящее время в объеме технологических разработок РУ ГТ-МГР и МГР-Т [7].

Основными вопросами, требующими проведения дополнительных НИОКР, являются:

- отработка технологичности изготовления высокотемпературных теплообменников;
- обоснование безопасности РУ для производства водорода;
- разработка алгоритмов регулирования мощности РУ совместно с системами управления технологическими процессами;
- проведение аттестационных испытаний жаропрочных металлических материалов.

Одним из основных ограничений при увеличении температуры гелия на выходе из реактора является предельно допустимая температура длительной эксплуатации ВКМ реактора. При увеличении температуры гелия на входе в активную зону до 600 °С для достижения приемлемой температуры материала корпуса реактора (~350 °С) предполагается доработать конструкцию активной зоны в части отвода тепла к системе охлаждения корпуса реактора.

Серьезные требования предъявляются к газходам, транспортирующим нагретую технологическую среду с температурой до 900 °С, которая не должна снижаться из-за тепловых потерь, поскольку от уровня температуры зависит эффективность технологического процесса.

Водородное производство представляет собой потенциальный источник взрывоопасности. При анализе безопасности МГР-100 в качестве исходных событий следует рассматривать аварии в технологической части станции или на промышленных площадках. При этих авариях возможен выброс технологического сырья или продуктов переработки. С точки зрения принятия защитных мер, наихудшие последствия для безопасности могут быть вследствие воздействия ударной волны после взрыва этих продуктов.

В качестве одного из критериев безопасности следует принимать не превышение максимального выброса взрывоопасных смесей в технологическом производстве. Количество выброса определяется допустимым значением избыточного давления во фронте ударной волны, принятым для защитной оболочки, систем и элементов АС.

При анализе таких аварий следует рассматривать как сценарии с возможностью взрыва в непосредственной близости от реактора, так и обеспечение безопасности за счет пространственного разделения ядерной и технологической части.

4 Заключение

Развитие технологии МГР в России с самого начала было направлено на использования атомной энергетики не только для производства электричества, но и для промышленного теплоснабжения как альтернатива использования органического топлива.

Технология модульных ВТГР, благодаря уникальным свойствам по эффективности, безопасности и экологичности, может обеспечить комплексное энергоснабжение

электричеством, теплом и топливом, в том числе решить актуальную проблему экономически эффективного производства водорода.

Экологически безопасные и требующие небольших затрат на создание и обслуживание атомные станции малой мощности на основе ВТГР могут стать важными элементами инфраструктуры ядерной энергетики текущего столетия.

Выполненные к настоящему времени проектные и экспериментальные работы по вариантам модульных МГР-100 для различного энерготехнологического применения подтверждают возможность удовлетворения требований к реакторным установкам нового поколения.

Отработка энерготехнологии ВТГР на базе МГР-100 позволит существенно снизить общие затраты по программе ВТГР и продемонстрировать возможности и преимущества с целью дальнейшей коммерциализации этой технологии.

Список литературы

1. “Атомная теплофикация России – имеющийся опыт, потенциал отрасли, проблемы развития” Болдырев В.М., Сборник тезисов межотраслевой научно-технической конференции “Региональная Атомная Энергетика” (Атом Регион-2009), 17-18 ноября 2009 года, Нижний Новгород.

2. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства России от 13 ноября 2009г №1715

3. “Возможности и перспективы использования ядерных высокотемпературных реакторов для обеспечения энергоемких производств энергосистемами” Пономарев-Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Кодочигов Н.Г. Сборник тезисов межотраслевой научно-технической конференции “Региональная Атомная Энергетика” (Атом Регион-2009), 17-18 ноября 2009 года, Нижний Новгород.

4. Статья «Развитие централизованного теплоснабжения в России», стр. 2-15. Журнал «Теплоэнергетика №12; 2009» С.П.Филипов, Институт энергетических исследований РАН.

5. Васяев А.В., Владимирский М.К. и др. Энергоисточник на основе ВТГР для энерготехнологического применения. Схемно-конструктивные решения. - Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования (Том 2)/Под редакцией В.В. Вишневого. - М.: Академия наук о Земле, 2008., с.108-112, ISBN 978-5-93411-050-6.

6. Kiryushin A.I., Kodochigov N.G., Kuzavkov N.G. e.a. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine. – Nucl. Engng Design, 1997, v. 173, p. 119–129.

7. High temperature gas cooled reactor – source of energy for commercial production of hydrogen. Mitenkov F.M., Kodochigov N.G., Vasyaev A.V., Golovko V.F., Ponomarev-Stepnoy N.N., Kukharkin N.Ye., Stolyarevsky A.Ya. - Nuclear power, vol. 97, issue 6, December 2004, p. 432-446.

Журнал «Новости теплоснабжения» №2, 2011 г, <http://www.ntsni.ru/>