

ный уровень вблизи 4 с соответствует плавлению стальной оболочки. На рисунке также приведены результаты анализа неопределенности исходных данных. Наибольшее влияние на моделирование температуры оказала погрешность определения коэффициента черноты поверхности твэла, который в большей степени определяет стационарную температуру. Погрешность расчета температуры составила 50 К.

Таким образом, показано, что результаты расчета с помощью модуля SAFR/V1 совпадают с экспериментом. Погрешность расчета температуры составила 50 К, массового расхода — 5%, массовой доли — 6%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алипченков В.М., Беликов В.В., Васекин В.Н. и др. Верификация интегрального универсального расчетного кода ЕВКЛИД/V1 применительно к установкам БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200. — В сб.: Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики. Москва, 7—10 октября, 2014, т. 2, с. 175—191.
2. Spencer B. Final Report on TREAT Tests R4 and R5; Seven-pin, Loss-of-Flow Tests with Full-Length, Unirradiated FFTF-type Fuel Pins. ANL, 1979.
3. Holtz R. Final Report on TREAT Test R3 and R5; A Single-Pin Loss-of-Flow Experiment. ANL, 1977.
4. Deitrich L. Experiments on transient fuel failure mechanisms. — In: Presentation at the Intern. Working Group on Fast Reactors Specialists Meeting on Fuel Failure Mechanisms. Washington, May 11, 1975. 52 p.
5. Wrona B., Galvin T., Stahl D. Out-of-reactor experimental study of fuel-pin failure phenomena. — In: Meeting on Fast Reactor Safety and Related Physics. Chicago, October 6, 1976, p. 1—12.
6. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Семенычев М.А. Исследование плавления твэлов на имитаторах с топливными композициями. — Атомная энергия, 1991, т. 70, вып. 2, с. 108—110.
7. Усынин Г.Б., Аношкин Ю.И., Власичев Г.Н. и др. Модельное изучение процессов, возникающих при перегреве твэлов. — Там же, 1986, т. 61, вып. 5, с. 347—350.
8. Власичев Г.Н. Расчетный анализ экспериментов по разрушению электрообогреваемых имитаторов твэлов ядерных реакторов. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2000, № 4, с. 28—37.
9. Калашникова А.А., Усов Э.В. Разработка программного модуля для расчета плавления твэлов и перемещения расплава в реакторных установках на быстрых нейтронах на этапе тяжелой аварии. — В сб.: III Рос. молодежная конф. «Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи». Томск: ООО «СКАН», 2015, с. 135—138.
10. Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др. Моделирование плавления твэла быстрого реактора и затвердевания образующегося расплава с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 3, с. 123—127.
11. Усов Э.В., Бутов А.А., Чухно В.И. и др. Моделирование перемещения расплава по поверхности твэла быстрого реактора при тяжелой аварии с помощью модуля SAFR/V1 интегрального кода ЕВКЛИД/V2. — Там же, вып. 4, с. 197—201.
12. Алипченков В.М., Анфимов А.М., Афремов Д.А. и др. Базовые положения, текущее состояние разработки и перспективы дальнейшего развития теплогидравлического расчетного кода нового поколения HYDRA-IBRAE/LM для моделирования реакторных установок на быстрых нейтронах. — Теплоэнергетика, 2016, № 2, с. 54—64.
13. Усов Э.В., Бутов А.А., Дугаров Г.А. и др. Система замыкающих соотношений двухжидкостной модели кода HYDRA-IBRAE/LM/V1 для расчета процессов при кипении натрия в каналах энергетического оборудования. — Там же, 2017, № 7, с. 48—55.

Поступила в Редакцию 3.10.17

УДК 621.039.577-182.3

ТРАНСПОРТАБЕЛЬНЫЕ ЯЭУ С ОТКРЫТЫМ И ЗАМКНУТЫМ ГАЗОТУРБИННЫМ ЦИКЛОМ

Ганин М.Е., Головки В.Ф., Кодочигов Н.Г., Кузнецов Л.Е., Петрунин В.В.
(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

Создание транспортабельных атомных станций малой мощности для электро- и теплоснабжения удаленных регионов рассматривалось в начале становления ядерной энергетики, поскольку сооружение энергоисточников на органическом топливе нерентабельно [1—3]. Электрическая мощность таких станций состав-

ляла от 100 кВт до 1 МВт, мощность теплоснабжения до 1,5 МВт при кампании реактора не менее 20 лет, к которой приравнивается срок службы установки. Преимущество транспортабельных атомных станций состоит в возможности их доставки до места эксплуатации в готовом состоянии.

Тип реактора и система преобразования тепловой энергии в электрическую зависят от назначения, территории расположения, вида транспортного средства и климатических условий. Особенно это относится к удаленным регионам Крайнего Севера с экстремальными климатическими условиями: температура окружающего воздуха от -50 до 35 °С при отсутствии воды для сброса неиспользованной теплоты. Этим условиям отвечают установки с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами и системой преобразования энергии на базе газотурбинного цикла. Анализ станций с газотурбинным циклом дает возможность определить направления развития и конфигурацию установок.

Транспортабельные атомные станции с газотурбинным циклом (табл. 1). Установку Памир-630Д начали разрабатывать в 1963 г. в ИЯЭ АН БССР, ФЭИ, ИАЭ им. И.В. Курчатова и ОКБМ. Согласно проекту установка должна была обеспечить:

возможность эксплуатации в условиях температуры окружающей среды -50 — 35 °С при высокой влажности и отсутствии источников водоснабжения;

максимальную автоматизацию управления;

время монтажа на площадке не более 6 ч, время демонтажа в транспортное состояние не более 30 ч, ее размеры должны были ограничиваться габаритами перевозимых грузов по железной дороге и размещаться в грузовых кабинах самолетов;

кампанию реактора при номинальной мощности не менее 10 000 ч при непрерывной работе не менее 2000 ч.

В качестве теплоносителя и рабочего тела использовался диссоциирующий тетраоксид азота N_2O_4 . Позднее в теплоноситель была введена 1%-ная добавка оксида азота, что позволило более чем в 10 раз снизить коррозионную активность теплоносителя. Аварийное охлаждение реактора при большом количестве жидкого теплоносителя в контуре осуществлялось за счет пассивного перетекания испаряющегося теплоносителя через реактор из части высокого давления контура в конденсатор.

Комплекс передвижной атомной станции состоял из четырех блоков, располагающихся на автомобильных платформах МАЗ-9994: реакторного грузоподъемностью 65 т, турбогенераторного, системы автоматического управления, защиты и контроля с пультами, вспомогательного с двумя дизель-генераторами мощностью по 100 кВт (рис. 1).

Испытания опытного образца в 1985—1987 гг. подтвердили возможность реализации заложенных идей. Одна из установок проработала около 2975 ч при мощности генератора 407 кВт вместо 630 кВт по проекту. Испытания были прекращены в 1988 г. вследствие недостаточной научной обоснованности выбора теплоносителя.

В 1983—1985 гг. Всесоюзный научно-исследовательский тепловозный институт, Коломенский завод и некоторые другие организации

Т а б л и ц а 1. Основные параметры и характеристики транспортабельных атомных станций малой мощности

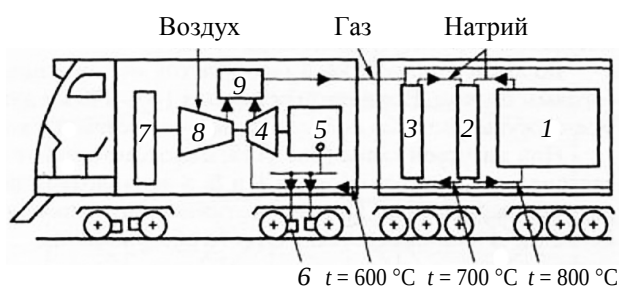
Характеристика	Памир-630Д	Атомовоз	СВБР-МГТ	ML-1 (США)
Мощность реактора, МВт	4,95	30	—	3,3
Электрическая мощность, МВт:				
полная	0,63	—	1—1,5	0,4
полезная	407	—	—	0,3
достигнутая	—	—	—	0,14
Число контуров	1	3	2	1
Теплоноситель	N_2O_4	Na/NaK/воздух	Свинец—висмут/воздух	Азот
Параметры теплоносителя:				
давление, МПа	7,75	—	~0,1	2,2/2,02
температура на входе/выходе, °С	190/503	360—480/600	—	430/649
Высота/диаметр активной зоны, м	0,5/—	—/0,4	—	0,56/—
Кампания реактора, год	1—2	—	—	—
Время непрерывной работы реактора	2000 ч	—	20 лет	—



Р и с. 1. Транспортабельная атомная станция с газотурбинным циклом «Памир-630Д» — реакторный энергоблок в процессе установки в позиционное положение

разработали конструктивную схему атомовоза с энергетической установкой на базе быстрого реактора типа БОР-60 и открытого газотурбинного цикла преобразования энергии. Были проработаны варианты ЯЭУ, которую можно было использовать для локомотива или передвижной электростанции. Для создания атомовоза необходимо было обеспечить безопасность обслуживания, исключить повреждения реактора при авариях, надежно расхолаживать, массу реактора с защитой ограничить не более 100—120 т, максимальный размер реактора ограничить допустимыми габаритами грузов, перевозимых по железной дороге.

ЯЭУ состоит из трех секций: средняя — реакторная на двух четырехосных тележках тепловоза ТЭМ-7, две крайние секции — тяговые на базе экипажной части серийных тепловозов 2ТЭ-116 (рис. 2). Схема установки трехконтурная: два контура со сплавом натрия—калий, третий — воздушный. В теплообменнике треть-



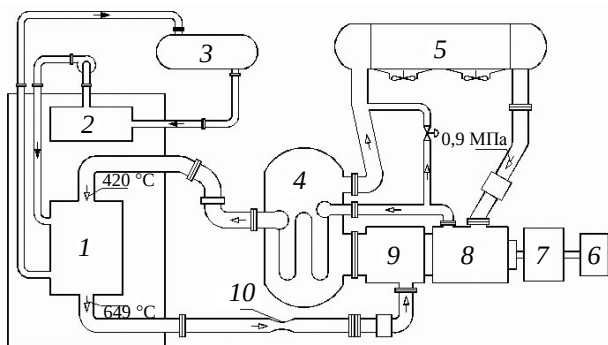
Р и с. 2. Схема атомного локомотива (показаны крайняя и средняя секции): 1 — реактор; 2, 3 — теплообменники; 4 — турбина; 5 — электрогенератор; 6 — тяговый электродвигатель; 7 — вспомогательный двигатель внутреннего сгорания; 8 — компрессор; 9 — регенератор

его контура воздух для газотурбинной установки нагревается до 600 °С.

Проработано применение серийной газотурбинной установки типа Д-012Т-3, мощность которой в зависимости от степени регенерации должна составлять 2,5—3 МВт и к.п.д. ~20%. Активная зона окружена экранами-отражателями из UO_2 , стали и необогащенного урана. Тепловая мощность реактора 30 МВт позволяет получить на ободе колес касательную мощность локомотива 5—6 МВт. Масса реактора с биологической защитой по нормам радиационной безопасности (НРБ-99/2009), теплообменниками и системами управления около 140 т, что превышает ограничения по массе. Размеры установки позволяют ее вписать в требуемый габарит. Требования по безопасности для населения обеспечиваются посредством ограничения частоты и скорости прохождения атомного локомотива по станционным путям, а также изменения в этот период его мощности.

СВБР-МГТ предложена к разработке в АО «ГНЦ РФ — ФЭИ» для использования в районах Арктики. Двухконтурная установка предполагает применение открытого газотурбинного цикла в составе свинцово-висмутового реактора. В первом контуре реализуется естественная циркуляция при атмосферном давлении. Перегрузки топлива на месте не требуется в течение ~20 лет. За счет естественной циркуляции наружного воздуха организуется постоянный теплоотвод через корпус реактора. Во втором контуре реализуется низкое давление воздуха. В схеме отсутствует необходимость поддерживать постоянную частоту вращения турбогенератора (статические преобразователи частоты) и регулирующей арматуры в воздушном контуре. Простота схемы, сборки и монтажа, малая численность персонала (два человека в смену), работа в автоматическом режиме, а также простота пуска (требуется только электроэнергия ~100 кВт) способствуют быстрой передислокации на новую площадку.

Транспортабельная ЯЭУ ML-1 (США) была разработана и введена в эксплуатацию для нужд армии. Она является первой в мире ЯЭУ с газовым охлаждением и прямым замкнутым газотурбинным циклом. Установка достигла критичности в марте 1961 г., ее пуск состоялся в сентябре 1962 г. В 1963 г. начались испытания.



Р и с. 3. Тепловая схема установки ML-1 (США): 1 — реактор; 2, 3 — охладитель воды защиты и воды замедлителя соответственно; 4 — рекуператор; 5 — холодильник; 6 — генератор; 7 — двигатель пуска; 8 — компрессор с редуктором; 9 — турбина; 10 — расходомер

В ML-1 в качестве теплоносителя — рабочего тела цикла использовался азот, замедлителем служила вода. Азот после компрессора нагревался в рекуператоре до 420 °С, в реакторе догревался до 650 °С и подавался в турбину. Теплота в предварительном холодильнике установки отводилась воздухом. Для уменьшения объема и массы установки давление на входе в турбокомпрессор было принято равным 0,9 МПа (рис. 3). Установка размещалась в шести стандартных морских контейнерах: реакторном, электроэнергетическом, автоматического управления и защиты, контроля и связи, инструментальном и контейнере хранения отходов и выработки азота. Масса двух главных контейнеров составляла около 15 т, четырех дополнительных 3—4 т. Их габариты позволяли вписаться в любую из армейских транспортных систем, включая самолет С-130, стандартные грузовики и железнодорожный транспорт (рис. 4). Установка могла начать работать на полной мощности через 12 ч после доставки в заданный пункт, быть разобранной и подготовленной для перевозки в другое место через 24 ч после ее остановки. Реактор вместе с биологической защитой размещался в баке диаметром 2,7 м, заполненном



Р и с. 4. Реакторный блок транспортабельной ЯЭУ ML-1 (США) на прицепе армейского тягача

борированной водой. Радиационная безопасность обеспечивалась удалением персонала от реактора на расстояние не менее 150 м. Были испытаны два компрессора: 11-ступенчатый осевой и 2-ступенчатый центробежный. Компрессоры не достигли проектных характеристик. После нескольких сот часов испытаний в 1965 г. программа была закрыта по нескольким причинам:

низкий к.п.д. — мощность составила 140 вместо 300 кВт, что объясняется низкой температурой газа 650 °С по сравнению с 1100 °С для типовых установок;

сокращенный бюджет программы из-за войны во Вьетнаме.

В результате анализа можно сделать следующие выводы. В 1950—1980 гг. в СССР и США были разработаны, созданы и испытаны опытные транспортные атомные станции малой мощности с газоохлаждаемыми и другими реакторами с газотурбинным циклом преобразования тепловой энергии в электрическую. В зависимости от типа реактора и газотурбинного цикла использовались одно-, двух- и трехконтурные конфигурации установок. В качестве рабочего тела в газотурбинных контурах приняты азот, воздух и диссоциирующий газ N_2O_4 . Достижению высокой степени безопасности способствовала малая мощность реакторов, благодаря чему был реализован принцип внутренней самозащищенности (отвод остаточного тепловыделения через корпус реактора на основе пассивных принципов). Была показана техническая возможность создания и эксплуатации транспортных атомных станций малой мощности.

ЯЭУ С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ГАЗООХЛАЖДАЕМЫМ РЕАКТОРОМ, РАЗРАБОТАННАЯ В АО «ОКБМ АФРИКАНТОВ»

Выбор теплоносителя первого контура, теплофикации и охлаждения. Одним из главных критериев выбора теплоносителя ЯЭУ для экстремальных климатических условий является отсутствие фазовых превращений в диапазоне рабочей температуры –60—900 °С. Поэтому из рассмотрения были исключены следующие теплоносители: вода, металлические (свинец, свинец—висмут, натрий) и расплавы солей. Кроме того, в случае применения системы преобразо-

вания энергии с прямым газотурбинным циклом, реализуемым в первом контуре, свойства теплоносителя должны сочетаться со свойствами рабочего тела. Этому критерию отвечают газовые теплоносители. Анализ теплоносителей — гелий, азот, углекислый газ по теплофизическим свойствам (удельной теплоемкости,

плотности, теплопроводности и динамической вязкости) показывает, что с точки зрения возможности получения оптимальных габаритных размеров основного оборудования первого контура (реактора, теплообменного оборудования) в качестве теплоносителя одноконтурной атомной газотурбинной установки предпочтительнее

гелий. Опыт эксплуатации гелиевых контуров экспериментальных и реакторных установок показал, что проблема удержания гелия в контуре успешно решается.

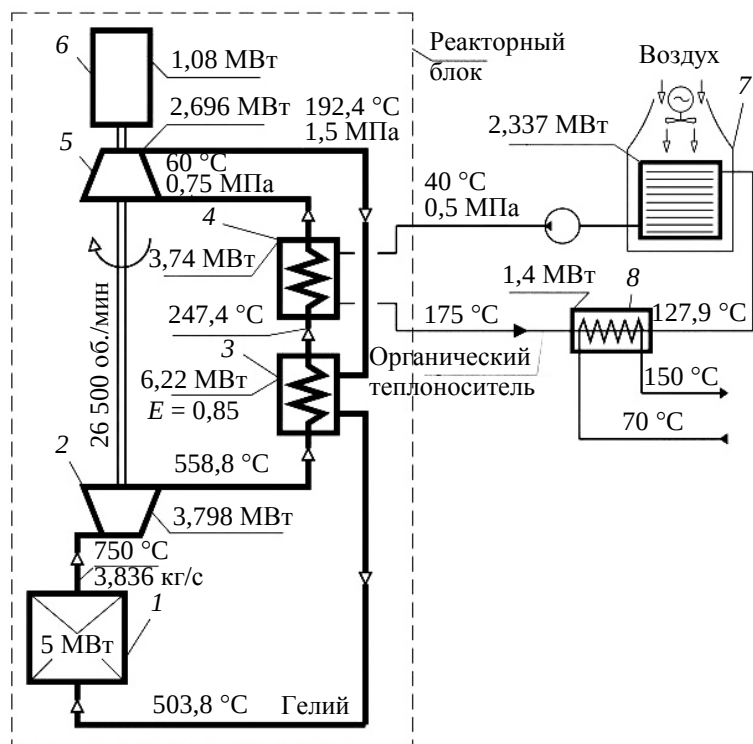
При выборе теплоносителя контуров охлаждения и теплофикации основное внимание уделялось высокой теплопроводности, термической стабильности и продолжительному сроку службы в диапазоне температуры $-60—300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этим требованиям отвечают низкотемпературные органические теплоносители, например, TERMOLAN-LT производства ООО «НПК «Полиэстер».

Выбор тепловой схемы и параметров. Рассматривали два варианта исполнения ЯЭУ с высокотемпературным реактором и разными системами преобразования энергии:

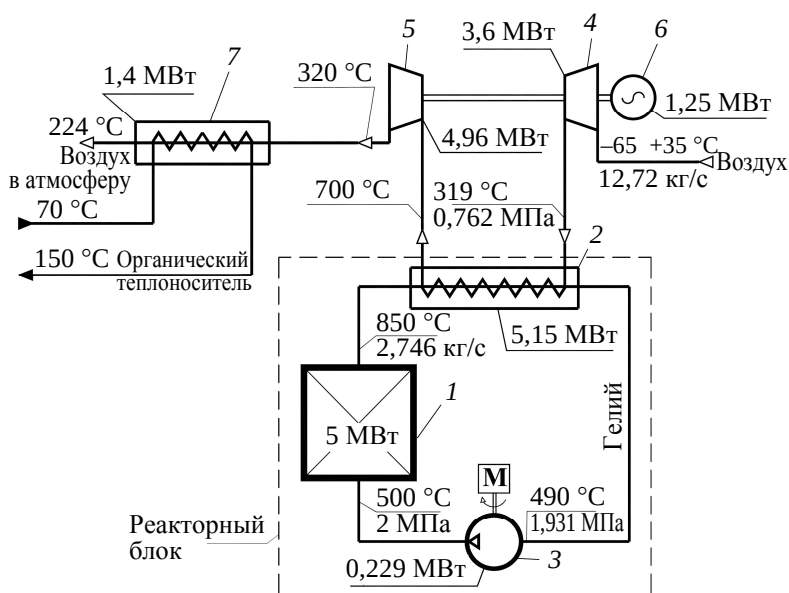
ЯЭУ с системами преобразования энергии на основе замкнутого газотурбинного цикла, теплоснабжения и отвода неиспользованного тепла к воздуху (рис. 5);

ЯЭУ с системами преобразования энергии на основе открытого газотурбинного цикла теплоснабжения, которая предполагает использование отработанных газотурбинных установок, применяемых в авиации (рис. 6).

Для работы ЯЭУ в составе газотурбинной установки сохраняются камеры сгорания. В авиационных газотурбинных установках с высокой степенью сжатия при температуре газов на входе в турбину до $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ достигается к.п.д. до 33%. В ЯЭУ с ядерным подогревом воздуха к.п.д. ниже, поскольку при приемлемых габаритах и конструкционных материалах теплообменников температура воздуха может быть достигнута в диапазоне $700—800\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Р и с. 5. Тепловая схема ЯЭУ с замкнутым газотурбинным циклом: 1 — реактор; 2 — турбина; 3 — рекуператор; 4 — конечный холодильник; 5 — компрессор; 6 — генератор; 7 — градирня; 8 — сетевой теплообменник



Р и с. 6. Тепловая схема ЯЭУ с открытым газотурбинным циклом: 1 — реактор; 2 — высокотемпературный теплообменник; 3 — главная циркуляционная газодувка; 4 — компрессор; 5 — турбина; 6 — генератор; 7 — сетевой теплообменник

Возможности применения тепловой схемы ЯЭУ с открытым газотурбинным циклом подтверждают концептуальные проработки, выполненные в НИЦ «Курчатовский институт», установок с высокотемпературным реактором и газотурбинной установкой, работающей по открытому воздушному циклу различной степени сложности. Проработки показали высокую экономичность в сочетании с простой схемой преобразования энергии для температуры воздуха на входе в турбину 700 °С. Установка с одноступенчатым сжатием достигает к.п.д. от 31,5%.

Параметры установок определяли, исходя из ограничений массогабаритных характеристик оборудования ЯЭУ и достижения максимально возможного коэффициента использования тепла при использовании освоенных конструкционных материалов. Температура гелия на выходе из активной зоны реактора принималась:

для замкнутого цикла равной 750 °С, что позволяет обеспечить длительный ресурс лопастной системы турбины (100 тыс. ч) из освоенных промышленностью жаростойких сплавов без дополнительного охлаждения ее ступеней;

для открытого цикла 850 °С, что позволяет обеспечить ресурс теплообменника гелий—воздух (100 тыс. ч) из освоенных промышленностью жаростойких сплавов и приемлемую температуру воздуха на входе в турбину 700 °С.

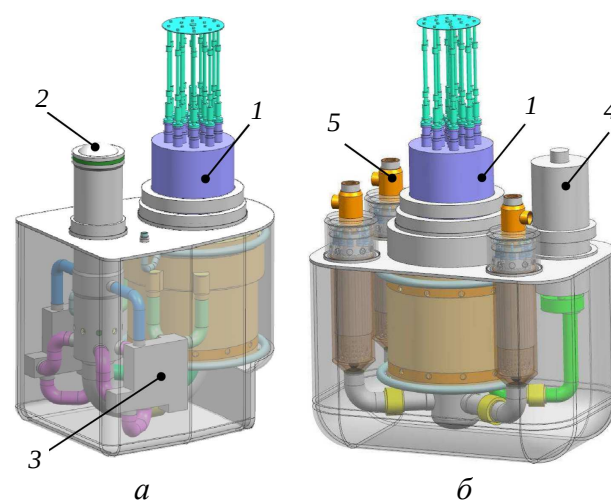
Эффективность оборудования определяли, исходя из опыта проектирования [4] и данных [5, 6]. Для турбомшины приняты осевая турбина с к.п.д. 0,865, центробежный компрессор с к.п.д. 0,802 и к.п.д. генератора 0,98. Давление и обороты турбомшины в замкнутом цикле принимали из опыта разработок газотурбинных установок на гелии при относительно малой мощности и объемном расходе для достижения размеров лопастной системы, обеспечивающей проектные к.п.д. турбины и компрессора. Эти условия требуют повышения оборотов турбомшины более 165 Гц и давления на выходе из компрессора менее 1,5 МПа. Суммарную степень повышения давления в компрессоре замкнутого цикла ($\pi_k = 2$) принимали, исходя из получения максимального к.п.д. цикла, а также приемлемой температуры гелия на входе в рекуператор, обеспечивающей его надежную работу. Степень рекуперации принимали равной 0,85 с учетом температуры на входе в реактор,

которая ограничивается допустимой температурой корпуса, приемлемых габаритов рекуператора и потерь давления по трактам, достижения необходимой температуры органического теплоносителя на выходе конечного холодильника для передачи части неиспользованного тепла в цикле с требуемым температурным потенциалом сетевому контуру. Температура гелия на входе в компрессор 60 °С определялась максимальной температурой окружающего воздуха 35 °С.

Компоновка и оборудование. Оборудование разработанных установок объединяется по функциональной принадлежности в отдельные блоки: реакторный, преобразования тепловой энергии в электрическую, отпуска тепла на отопление и отвода неиспользованного тепла. В установке с прямым замкнутым газотурбинным циклом реакторный блок предназначен для выработки тепловой энергии и ее преобразования в электрическую энергию в цикле Брайтона (рис. 7, а).

В ЯЭУ с открытым газотурбинным циклом реакторный блок предназначен для передачи тепловой энергии, генерируемой в реакторе, через промежуточный теплообменник воздуху второго контура. Реакторный блок имеет интегральную компоновку с размещением в нем реактора, газодувки теплоносителя первого контура и промежуточного теплообменника (рис. 7, б).

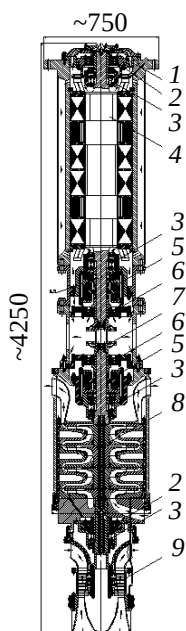
Реактор. Несмотря на разную температуру гелия на выходе из реактора — 750 и 850 °С для ЯЭУ с замкнутым и открытым газотурбинным циклом предполагалось использовать реактор



Р и с. 7. Реакторный блок с замкнутым (а) и открытым газотурбинным циклом (б): 1 — реактор; 2 — турбомшина; 3 — рекуператор; 4 — газодувка; 5 — теплообменник

одного типа. Как и в космической ядерной установке, рассматривался реактор с двумя вариантами схемно-конструктивного исполнения органов регулирования: поворотного и стержневого типа. Реактор и его выемная часть с активной зоной и исполнительные механизмы СУЗ, блоки отражателя и теплоизоляция размещены внутри корпуса реакторного блока. Активная зона образована регулярной решеткой гладкостержневых твэлов с таблеточным топливом из UZrCN , оболочкой из тугоплавкого сплава и стержнями с поглотителем из Gd_2O_3 для компенсации положительной реактивности в случае заполнения реактора водой. Активная зона со всех сторон окружена отражателями из BeO . Рабочие органы СУЗ имеют в качестве поглощающего материала карбид бора. Перегрузка топлива в активной зоне при эксплуатации реактора не предусмотрена. Оценки нейтронно-физических характеристик активной зоны подтверждают обеспечение кампании до 80 тыс. эф. ч.

Оборудование для установки с прямым замкнутым газотурбинным циклом. Турбомашина представляет собой агрегат вертикального исполнения (рис. 8). Турбокомпрессор с генератором объединены единым валом. Турбина осевого, компрессор центробежного типа. При пуске и останове турбомшины генератор



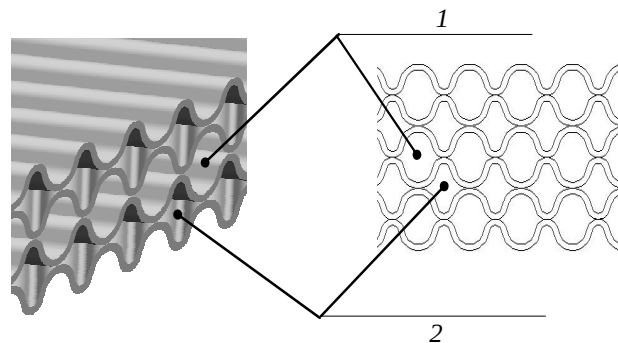
Р и с. 8. Турбомашина: 1 — лопастное колесо; 2 — радиальный резервный подшипник; 3, 5 — радиальный и осевой электромагнитные подшипники; 4 — генератор; 6 — радиально-упорный резервный подшипник; 7 — соединительная муфта; 8 — компрессор; 9 — турбина

может работать в двигательном режиме с потреблением электрической энергии от внешнего энергоисточника (резервного дизель-генератора) через пусковой преобразователь частоты. Генератор размещен в среде гелия и герметизируется относительно внешней среды электрическими проходками. Тип генератора — синхронная электрическая машина с возбуждением от постоянных магнитов.

Рекуператор состоит из двух модулей, расположенных по сторонам турбомшины. Основу рекуператора составляет гофрированная пластинчатая теплообменная поверхность (рис. 9). Листы собраны в теплообменные модули. Все соединения элементов рекуператора выполнены сваркой. В каждом модуле кромки листов с торцов сварены через вставные планки, образуя каналы высокого и низкого давления с соответствующей шириной профиля гофры.

Концевой холодильник предназначен для отвода неиспользованного тепла в цикле, в аварийных режимах — для отвода остаточного тепла остановленного реактора. Холодильник выполнен из коррозионно-стойкой стали и конструктивно состоит из корпуса с входными патрубками гелия низкого давления, единой бухты из спиральных труб, входного и выходного коллекторов охлаждающего органического теплоносителя.

Воздушный теплообменник предназначен для отвода тепла от концевой холодильника органическим теплоносителем в атмосферу. Теплообменная поверхность, аналогичная поверхности в рекуператоре, сформирована в виде плоских наклонных смыкающихся в верхней части теплообменных матриц. В пространство между матрицами подводится воздух, который продувается через фронтальную поверхность матриц вентиляторами.



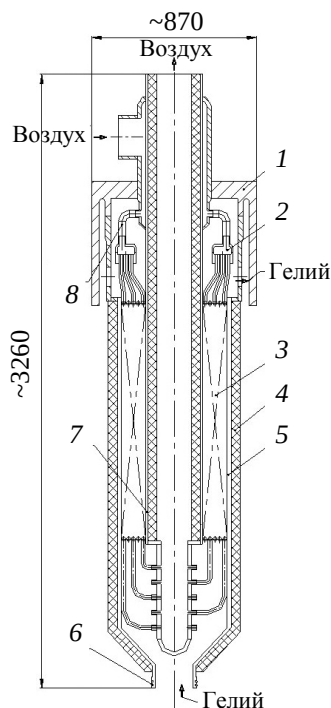
Р и с. 9. Фрагмент теплообменной поверхности: 1, 2 — полость низкого и высокого давления соответственно

Оборудование для установки с открытым газотурбинным циклом. Высокотемпературный промежуточный теплообменник предназначен для передачи выработанного в реакторе тепла теплоносителем первого контура к воздуху газотурбогенератора открытого цикла (рис. 10).

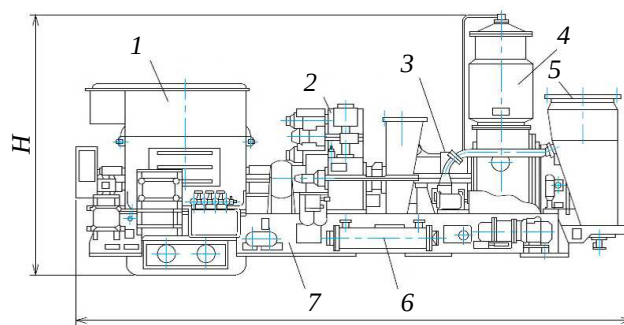
В качестве теплопередающей поверхности используется трубная система в виде единой бухты. Трубы объединены в отдельные коллекторы. Для разных элементов высокотемпературного промежуточного теплообменника применяются высоконикелевые сплавы.

Главная циркуляционная газодувка. Конструкция газодувки одновальная с встроенным асинхронным электродвигателем. Корпус является несущей конструкцией для элементов главной циркуляционной газодувки. Проточная часть состоит из осевого подвода со скользящим уплотнением, рабочего колеса центробежного типа и направляющего аппарата.

Газотурбинная установка смонтирована на одной раме с сетевым теплообменником. В качестве одного из аналогов выбран газотурбогенератор ГТГ-1250-2 производства «Пролетарский завод» (г. Санкт-Петербург), предназначен-



Р и с. 10. Высокотемпературный промежуточный теплообменник: 1 — крышка выемной части; 2 — коллектор трубной системы; 3 — трубная система; 4 — теплоизоляция; 5 — наружная обечайка; 6 — уплотнение; 7 — внутренняя обечайка; 8 — трубопроводы входа воздуха



Р и с. 11. Газотурбогенератор: 1 — генератор; 2 — редуктор; 3 — турбокомпрессор; 4 — камера сгорания; 5 — выхлопной патрубок; 6 — маслоохладитель; 7 — рама

ный для использования на морских судах в качестве автономных источников переменного трехфазного тока частотой 50 Гц, напряжением 400 В (рис. 11). Система регулирования газотурбогенератора обеспечивает автоматическое и дистанционное управление во всем диапазоне нагрузок от холостого хода до 110% номинальной мощности. Она характеризуется надежностью, простотой конструкции и большим ресурсом, запускается при отсутствии внешних источников электрической энергии. Турбокомпрессор одновальный с осевым компрессором, выносной противоточной камерой сгорания и осевой турбиной. Длина газотурбогенератора 6,7, высота 2,7, ширина 2,34 м. Для работы в рамках представленной схемы газотурбогенератор необходимо доработать для возможности отвода воздуха из напорной камеры компрессора в высокотемпературный промежуточный теплообменник и возвращения нагретого воздуха во входную камеру турбины.

Сетевой теплообменник, предназначенный для теплоснабжения потребителей с бухтовой трубной системой, встроен в выхлопной патрубок турбины. При этом предусматривается возможность его байпасирования с выбросом воздуха в атмосферу. Органический теплоноситель циркулирует в сетевом теплообменнике внутри теплообменных трубок, атмосферный воздух — в межтрубном пространстве.

Сравнительный анализ. По результатам схемно-конструктивных проработок и стоимостных оценок на примере ЯЭУ электрической мощностью 1 МВт проведен сравнительный анализ установок с замкнутым и открытым газотурбинным циклом. Хотя к.п.д. замкнутого цикла теоретически всегда выше, из табл. 2 следует, что к.п.д. производства электроэнергии в

обоих вариантах исполнения ЯЭУ одинаков. Это объясняется:

использованием осевого компрессора в газотурбинной установке открытого цикла, обладающего большим адиабатным к.п.д., чем у центробежного компрессора в турбомашине замкнутого цикла;

заниженной степенью рекуперации в замкнутом газотурбинном цикле, необходимой для обеспечения требуемого температурного потенциала сетевого теплоносителя. Габариты реакторного блока ЯЭУ как с замкнутым, так и с открытым газотурбинным циклом позволяют его транспортировать автомобильным, водным и при снятых приводах СУЗ железнодорожным транспортом. С точки зрения минимальных массогабаритных характеристик ЯЭУ с прямым замкнутым газотурбинным циклом предпочтительнее. Оценки нейтронно-физических характеристик активной зоны подтверждают достижение кампании 80 тыс. эф. ч. В обоих вариантах ЯЭУ оборудование первого контура предполагает однократную замену в течение 20 лет.

Таблица 2. Характеристика вариантов ЯЭУ с замкнутым и открытым газотурбинным циклом

Параметр	ЯЭУ с циклом	
	замкнутым	открытым
Полезная электрическая мощность, МВт	1	1
Тепловая мощность реактора, МВт	5	5
К.п.д., %	20	20
Габаритные размеры реакторного блока, отн. ед.:		
длина	1	1,16
высота	1	1,015
ширина	1	0,987
Масса ЯЭУ, отн. ед.	1	1,031
включая реакторный блок	1	1,1
газотурбинная установка	—	0,336
оборудование систем	1	0,373
Стоимость создания ЯЭУ, отн. ед.	1	0,71

Предварительный анализ НИОКР в создании вариантов ЯЭУ с ВТГР показал, что более компактным является вариант ЯЭУ с газотурбинной установкой открытого цикла. Для этого варианта потребуются НИОКР в обоснование

ресурса высокотемпературного промежуточного теплообменника гелий—воздух.

Оценки показали, что повышенные стоимостные показатели ЯЭУ с прямым замкнутым газотурбинным циклом в основном обусловлены большим объемом НИОКР для обоснования гелиевой турбомшины, стоимость которой сопоставима со стоимостью НИОКР для реакторного блока. В целом с точки зрения технических рисков стоимости и времени до проведения и завершения НИОКР по созданию и обоснованию гелиевых турбокомпрессоров для закрытого цикла предпочтительным представляется вариант ЯЭУ с открытым газотурбинным циклом.

Таким образом, схемно-конструктивные проработки показали возможность создания наземных транспортабельных ЯЭУ с ВТГР и разными вариантами систем преобразования энергии для электро- и теплоснабжения удаленных регионов Крайнего Севера с температурой атмосферного воздуха -50 — 35 °С, исключающих воду в качестве теплоносителя и конечного стока тепла. Решения, связанные с продлением кампании реактора и ресурса отдельного оборудования первого контура до 20 лет, требуют дальнейших проработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Транспортабельные** атомные энергетические установки. Опыт создания и эксплуатации. Международный проект ИНПРО. Задача «Правовое и институциональное обеспечение атомной энергетики на основе транспортабельных атомных энергетических установок». Вып. 2. М., РНЦ «Курчатовский институт», 2009.
2. **Гребеньков А.Ж., Михалевич А.А., Шароваров Г.А.** К истории создания передвижной атомной электростанции «Памир-630» в Белоруссии. — В сб.: История атомной энергетики Советского Союза и России. Под ред. В.А. Сидоренко. М., 2004, вып. 5.
3. **Бедениг Д.** Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы. М.: Атомиздат, 1975.
4. **Васяев А.В., Головкин В.Ф., Дмитриев И.В. и др.** Обоснование параметров и схемно-конструктивных решений блока преобразования энергии с газотурбинным циклом в составе АЭС с ВТГР. — Атомная энергия, 2005, т. 98, вып. 1, с. 24—36.
5. **Драгунов Ю.Г., Емельянов В.С., Ромадова Е.Л., Сметанников В.П.** Транспортабельная ядерная энергоустановка ГРЭМ для производства электроэнергии и тепла мощностью 1000 кВт(э). Перспектива развития системы атомных станций малой мощности в регионах, не имеющих централизованного электроснабжения. М.: Наука, 2011, с. 267—375.

6. Андреев П.В., Зарицкий Г.А., Максимов Ю.В. и др. Сравнительный анализ различных типов ЯЭУ для космических систем. — В сб.: XIII Всерос. межвузовская научно-техническая конф. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008, с. 28.
7. Большая энциклопедия транспорта. Железнодорожный транспорт. Т. 4. Материалы выставки «Научно-техническая документация в составе Архивного фонда Российской Федерации». М.: Большая Рос. Энциклопедия, 2003. 785—787 с.
8. Концепция маршевой ядерной энергоустановки электрической мощностью 500 кВт на основе газохлаждаемого реактора с газотурбинным преобразованием энергии по циклу Брайтона. — В сб.: Межд. конф. «Ядерная энергетика в космосе-2005». Москва—Подольск, 2005, с. 25.
9. Воронин Г.И., Дубровский Е.В. Эффективные теплообменники. М.: Машиностроение, 1973.

Поступила в Редакцию 8.12.17

УДК 621.039.57, 621.039.572

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАКТОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

*Солонин В.И., Сатин А.А., Дунайцев А.А., Крапивцев В.Г., Марков П.В., Гетья С.И.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва)*

Газоохлаждаемые тепловые и быстрые реакторы для производства электроэнергии в паро- и газотурбинных установках, получения высокопотенциального технологического тепла для энергоемких химических, металлургических процессов, а также водорода активно разрабатывались в 1960—1980 гг. [1—4]. Преимущество было отдано высокотемпературным газохлаждаемым реакторам с гелиевым теплоносителем, активной зоной из призматических ТВС или с засыпкой шаровых ТВЭЛов, медленно циркулирующих через активную зону. Реакторы большой и средней мощности имели корпус высокого давления (до 7 МПа) из предварительно напряженного железобетона, реакторы малой мощности выполнялись в металлическом корпусе.

Высокотемпературные газохлаждаемые реакторы разрабатывались и экспериментально обосновывались применительно к энергообеспечению космических миссий [5, 6]. С учетом высокой длительности эксплуатации (около 10 лет) базовым вариантом был выбран быстрый реактор с топливом из карбонитридных урановых композиций и конструкционными материалами на основе вольфрама и молибдена, никелевых сплавов. Преобразование тепловой энергии в электрическую планировалось осуществить по турбомашинному циклу Брайтона с гелий-ксеноновой смесью в качестве теплоносителя состава, % по массе: 92,83 Xe, 7,17 He.

В последнее время повышенное внимание уделяется разработке энергетических установок

с газохлаждаемыми модульными реакторами небольшой мощности. Их преимуществами являются полностью заводское изготовление, повышенная безопасность, базирующаяся на отрицательных обратных связях по реактивности и пассивных системах защиты и расхолаживания, инвестиционная привлекательность. Например, разрабатывается модульный многоцелевой газохлаждаемый быстрый реактор ЕМ2 с гелиевым теплоносителем, карбидурановым топливом и оболочками ТВЭЛов из карбида кремния.

В настоящей статье изложено обоснование гидродинамических характеристик контура теплоносителя высокотемпературного газохлаждаемого быстрого реактора малой мощности в составе энергоустановки, использующей турбомашинное преобразование по циклу Брайтона [7, 8]. Обоснование выполнено с учетом диагностики моделей контура теплоносителя, численного моделирования гидродинамики, тепло-массообмена в моделях с помощью трехмерных кодов улучшенной оценки CFD. Предполагали, что нейтронно-физические характеристики обеспечивают близкое к равномерному в сечении энерговыделение. Как следствие распределение расхода теплоносителя по трактам охлаждения ТВЭЛов должно быть равномерным, что обеспечивает одинаковый подогрев до допустимой температуры без гидравлического профилирования, которое увеличивает гидравлическое сопротивление активной зоны и, как следствие, затраты энергии на прокачку. Это особенно значимо для газовых теплоносителей [1].