

УДК 621.039.534.6:536.24

Василий Валентинович Глазков

ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной теплофизики, Россия, Москва, e-mail: VVGlazkov@gmail.com

Артем Михайлович Зотов

АО «НИКИЭТ», инженер-конструктор 1 категории, отдел исследовательских и изотопных реакторов, Россия, Москва, e-mail: zotov@nikiet.ru

Илья Александрович Зубрицкий

АО «НИКИЭТ», инженер 2 категории, отдел компьютерных и интегрированных систем, Россия, Москва, e-mail: ilya220101listru@mail.ru

Концепция использования теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки МБИР

Авторское резюме

Состояние вопроса. Атомная энергетика сталкивается с проблемой низкой маневренности энергетических установок, что затрудняет адаптацию к изменяющимся режимам энергопотребления. Существует необходимость разработки технических решений, позволяющих повысить гибкость атомных электростанций без существенных конструктивных изменений реакторных установок. Одним из перспективных направлений решения данной проблемы является внедрение систем теплового аккумулирования, которые позволяют накапливать избыточную энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в часы пиковых нагрузок.

Материалы и методы. Исследование проведено на базе исследовательской ядерной установки МБИР, а также на материале опубликованных статей о тепловом аккумулировании. Использованы методы анализа существующих схем теплового аккумулирования на атомных электростанциях, методы моделирования и выбора режимов работы теплового аккумулятора. Рассмотрен вариант конструктивной реализации теплового аккумулятора с использованием четырех насосов теплового аккумулятора и двухбакового накопителя теплоносителя.

Результаты. Разработана концепция использования двухбакового теплового аккумулятора с нитратно-нитритным солевым теплоносителем для исследовательской ядерной установки МБИР, включающая три режима работы: зарядка, разрядка и номинальный режим. Выбор теплоносителя обоснован его высокой по сравнению с натрием теплоемкостью и, что критически важно, повышенной безопасностью при возможном контакте с водой, что снижает риски при интеграции с пароводяным контуром. Предложена конструкция теплового аккумулятора, состоящая из бака-разрядки, бака-зарядки, четырех насосов теплового аккумулятора и запорной арматуры.

Выводы. Предложенная концепция теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки МБИР обеспечивает более эффективное использование тепловой энергии реактора, позволяет работать турбине в полупиковом режиме и может быть адаптирована для использования на отраслевых атомных электростанциях. Применение теплового аккумулятора создает возможность резервирования энергии и повышения маневренности энергетической установки. Предложенная концепция может быть применена в дальнейшем и для отраслевых АЭС.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, исследовательская ядерная установка МБИР, энергетическая эффективность, режимы работы теплового аккумулятора, солевые теплоносители, накопление энергии, атомная энергетика

Vasily Valentinovich Glazkov

National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Engineering Thermal Physics Department, Russia, Moscow, e-mail: VVGlazkov@gmail.com

Artem Mikhailovich Zotov

JSC "NIKIET", Design Engineer of 1st category, Research and Isotope Reactors Department, Russia, Moscow, e-mail: zotov@nikiet.ru

Ilya Aleksandrovich Zubritsky

JSC "NIKIET", Design Engineer of 2nd category, Computer and Integrated Systems Department, Russia, Moscow, e-mail: ilya220101listru@mail.ru

Concept of using a heat accumulator for MBIR research reactor

Abstract

Background. Nuclear power engineering faces the problem of low maneuverability of power plants, which makes it difficult to adapt to changing energy consumption modes. There is a need to develop technical solutions that increase the flexibility of nuclear power plants without significant design changes to reactor plants. One of the promising areas to solve this

problem is the introduction of heat storage systems that allow us to accumulate excess energy during periods of low consumption and use it during peak load hours.

Materials and methods. The study has been conducted using MBIR research reactor, as well as the material of published articles on heat accumulation. The authors have used the methods to analyze existing schemes of thermal accumulation for nuclear power plants, as well as methods to model and select operating modes of heat accumulator. A design option for implementation of a heat accumulator using four circulation pumps and a two-tank coolant storage tank has been considered.

Results. A concept for using a two-tank heat accumulator with a nitrate-nitrite salt coolant for the MBIR nuclear research reactor has been developed. This concept includes three operating modes: charging, discharging, and nominal condition. The choice of coolant is justified by its high heat capacity compared to sodium and, crucially, increased safety in case of possible contact with water, which reduces the risks during integration with the steam-water circuit. The proposed heat accumulator design consists of a discharge tank, a charging tank, four heat accumulator pumps (HAPs), and shutoff valves.

Conclusions. The proposed concept of a heat accumulator for the MBIR research reactor ensures more efficient use of the reactor thermal energy, allows the turbine to operate in a semi-peak mode, and can be adapted for use at industry-based nuclear power plants. The use of a heat accumulator offers an opportunity for energy storage and increased maneuverability of the power plant. The proposed concept can be applied in the future for industry-based nuclear power plants.

Key words: heat accumulator, MBIR research reactor, energy efficiency, operating modes of heat accumulator, coolant-salt, energy storage, nuclear power

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.1.040-048

Введение. Одной из актуальных задач современной атомной энергетики является повышение эффективности использования энергетических ресурсов [1]. Согласно прогнозу развития атомной энергетики, доля атомной энергии в мировом энергопотреблении увеличится с 5 до 7 %, а также в производстве электроэнергии – с 10,5 до 11–11,4 % [2]. В этой связи для развития энергетического потенциала атомной отрасли одной из важных задач является повышение эффективности использования энергии.

Особую проблему для атомной энергетики представляет необходимость обеспечения соответствия производства энергии изменяющемуся режиму потребления [3]. В отличие от традиционных тепловых электростанций, атомные электростанции характеризуются низкой маневренностью регулирования мощности, что существенно затрудняет их работу в условиях неравномерной нагрузки. При этом мощность энергоустановок должна быть рассчитана на максимально возможную нагрузку, что приводит к неполному использованию установленных мощностей в периоды пониженного энергопотребления [4].

Увеличение доли АЭС в общем производстве электроэнергии при одновременном сокращении доли ТЭС, традиционно привлекаемых к работе в переменной части графика нагрузок сети, ставит вопрос о необходимости привлечения АЭС к регулированию мощности электросети – увеличению генерации в дневное время и снижению в ночное [5]. Однако существуют два ключевых фактора, делающих привлечение АЭС к работе в переменных режимах экономически нецелесообразным: 1) более высокая капитальная составляющая стоимости производимой электроэнергии по сравнению с ТЭС; 2) низкие маневренные характеристики активных зон реакторов [2].

Хотя разработка специализированных высокоманевренных АЭС, допускающих изменение мощности энергоблока в широком диапазоне,

технически возможна, такой подход требует значительных затрат на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, что существенно повышает стоимость проектов.

Одним из перспективных решений данной проблемы является внедрение систем аккумулярования тепловой энергии [6]. Тепловые аккумуляторы позволяют накапливать избыточную энергию в периоды низкого потребления и использовать ее в часы пиковых нагрузок, что обеспечивает более равномерную загрузку основного оборудования АЭС. Такие системы способствуют повышению гибкости и надежности работы атомных электростанций, а также позволяют оптимизировать режимы их эксплуатации без снижения уровня безопасности.

Включение тепловых аккумуляторов в состав АЭС дает возможность регулирования режима работы энергетических установок без жесткой зависимости от режима потребления энергии, позволяя срезать пики графика нагрузки и заполнять провалы. Это особенно актуально в условиях развития распределенной генерации и увеличения доли возобновляемых источников энергии в общем энергобалансе, что создает дополнительные вызовы для обеспечения стабильности энергосистемы [5].

С точки зрения регулирования мощности энергосистемы существует несколько подходов. Первый предполагает сохранение за АЭС постоянной части графика нагрузок, при котором покрытие переменной части возлагается на специализированные маневренные газотурбинные, парогазовые или гидроаккумулирующие станции. Однако проведенные Всероссийским научно-исследовательским институтом атомных электростанций (ВНИИАЭС) исследования технико-экономической эффективности различных решений показали, что наиболее экономичным решением является именно аккумулярование тепловой энергии непосредственно на АЭС [5]. Этот подход позволяет реакторной установке

работать на постоянной мощности и с неизменными параметрами теплоносителя, в то время как реализация переменного графика выдаваемой в сеть мощности осуществляется только за счет изменения режима работы второго контура. Данное решение не только экономически выгодно, но и технически прогрессивно, так как не требует вмешательства в работу ядерной части энергоблока, что положительно сказывается на безопасности и ресурсе оборудования.

Объектом исследования является опыт реализации тепловых аккумуляторов на энергетических объектах.

Целью исследования является разработка концепции применения теплового аккумулятора для исследовательской ядерной установки (ИЯУ) МБИР с перспективой дальнейшего внедрения на отраслевых атомных электростанциях.

Методы исследования. В ряде работ [7–9] рассмотрены различные способы реализации использования тепловых аккумуляторов на АЭС.

В [7] проведено исследование эффективности использования теплового аккумуля-

тора для АЭС малой мощности. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности представлена на рис. 1. Для теплового аккумулятора используется тепловое аккумулирование посредством использования теплоты фазового перехода.

Аккумулирующие устройства данного типа содержат жидкость и паровую подушку над ней, при этом жидкость и пар находятся в термодинамическом равновесии (при температуре насыщения) [8]. В качестве аккумулирующей среды почти во всех случаях служит система вода–водяной пар.

В [7] рассмотрены два варианта использования аккумулятора теплоты с фазовым переходом в схеме АЭС малой мощности: вариант 1 – параллельно подогревателю высокого давления (ПВД1); вариант 2 – для генерации дополнительного пара в цилиндр низкого давления (ЦНД).

Принципиальные тепловые схемы турбоустановки с аккумуляторами теплоты представлены на рис. 2, 3.

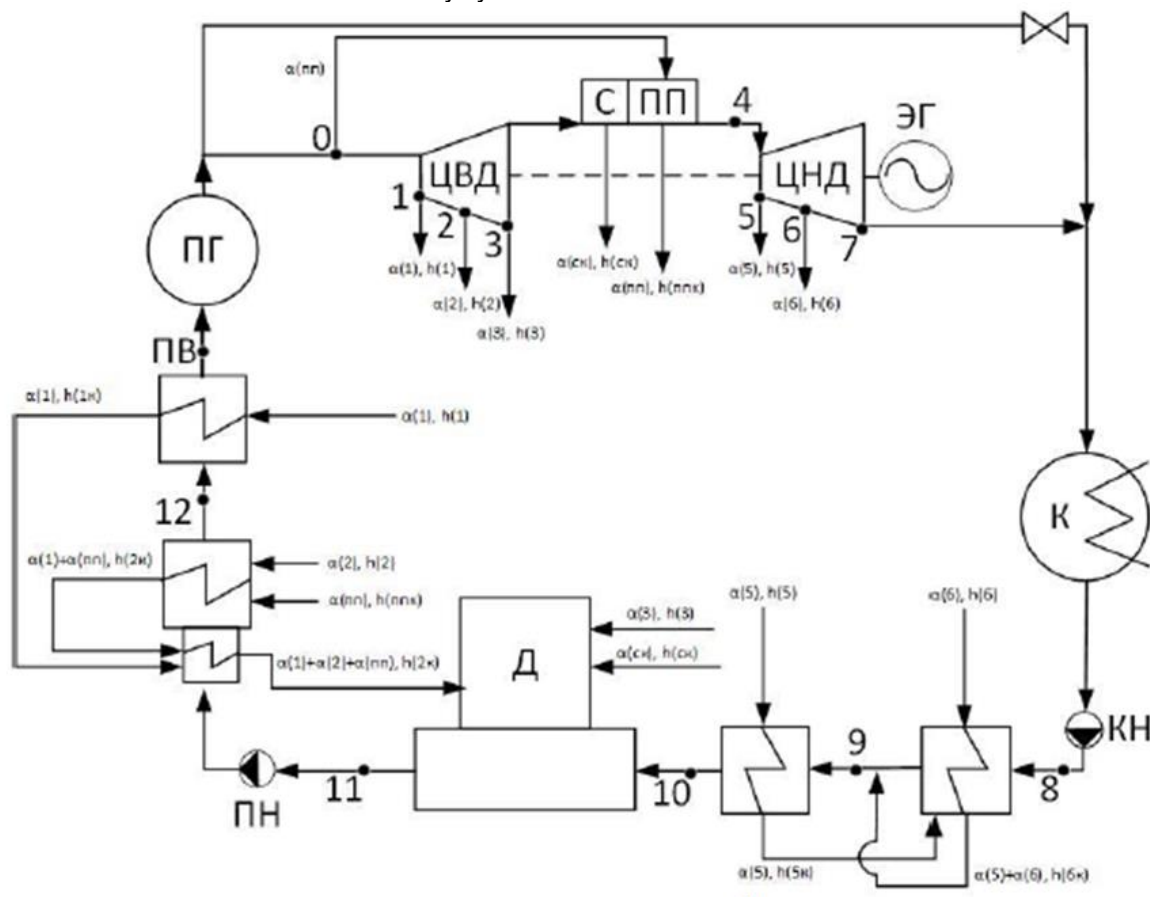


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР: ПГ – парогенератор; ЭГ – электрогенератор; Д – деаэратор; С – сепаратор; ПП – пароперегреватель; К – конденсатор; ПН – питательный насос; КН – конденсатный насос; h – энтальпия; α – доля расхода (от расхода пара из парогенератора); индексы: ПП – на пароперегреватель; 1 – на ПВД1; 2 – на ПВД2; 3 – на деаэратор; 5 – на ПНД3; 6 – на ПНД4; с – из сепаратора; к – конденсат; г – дополнительный пар низкого давления

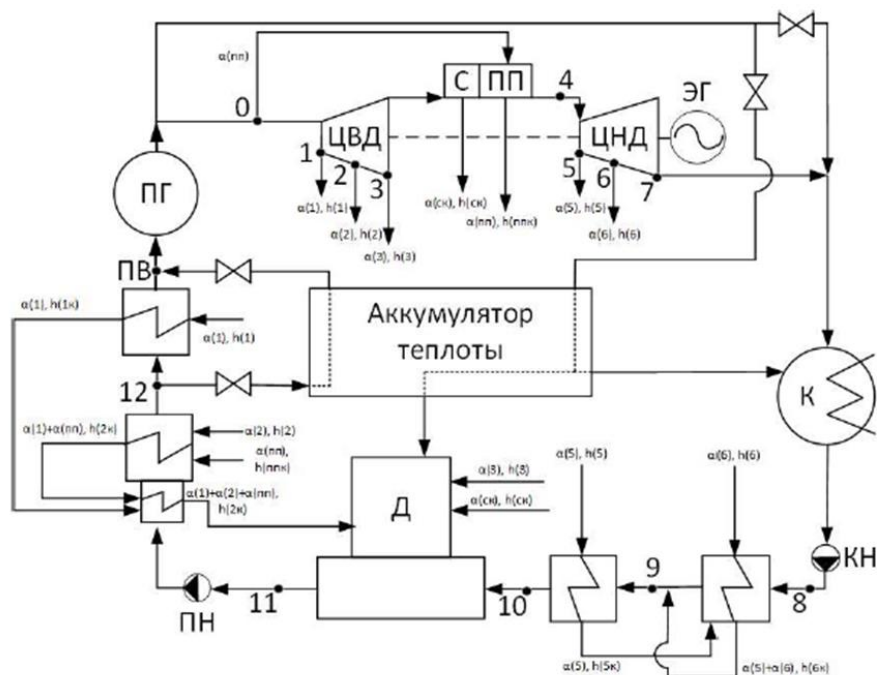


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР с аккумулятором теплоты (вариант 1)

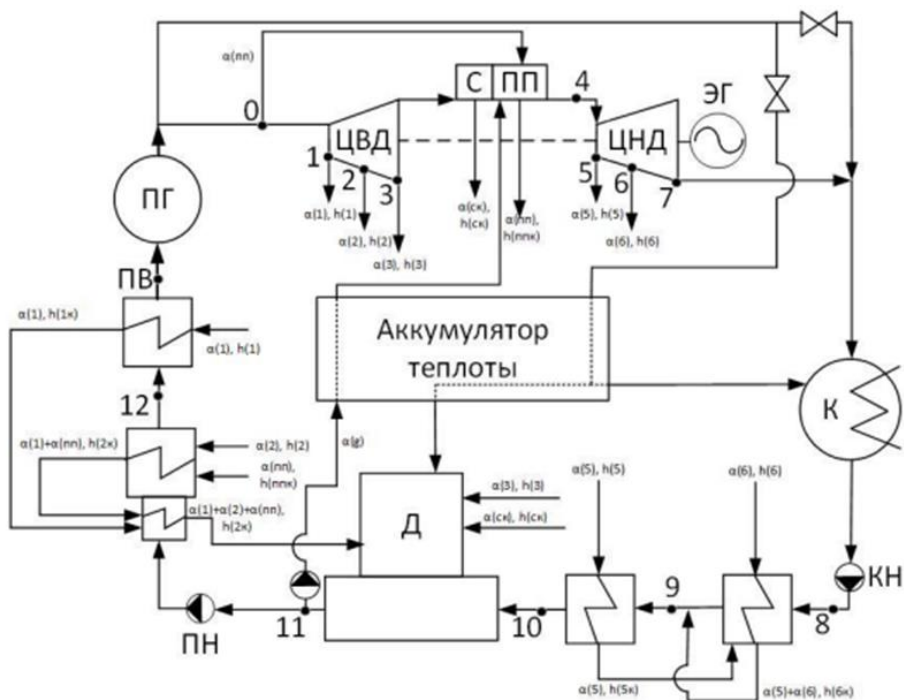


Рис. 3. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР с аккумулятором теплоты (вариант 2)

Анализ показателей эффективности показывает: для варианта 1 характерно увеличение мощности турбоустановки на 7,2 %, дополнительная выработка составляет 0,63 МДж/кг сбросного пара; для варианта 2 увеличение мощности турбоустановки составляет 6,6 %, при этом дополнительная выработка составляет 0,40 МДж/кг сбросного пара.

Более высокая эффективность варианта 1 обусловлена более широким диапазоном увеличения расхода пара: в варианте 1 увеличивается

расход пара в ЦНД и ЦВД, при этом в варианте 2 – только в ЦНД.

Кроме того, вариант 1 имеет следующие конструктивные преимущества:

- более простая конструкция аккумулятора;
- отсутствие необходимости в дополнительном насосе;
- отсутствие потребности в сепараторе и испарительной части.

Таким образом, вариант 1 технически проще и энергетически эффективнее.

В [9] для АЭС с ВВЭР-1000 предложен проект схемы теплового аккумулирования. В этом проекте для теплового аккумулирования использованы хемотермические циклы и установки.

Высокотемпературные хемотермические системы (ХТС) накопления и передачи энергии

рассматриваются как один из перспективных методов аккумулирования энергии. Данные системы основаны на процессах паровой конверсии метана.

Схема АЭС с аккумулятором питательной воды (АПВ) низкого давления представлена на рис. 4.

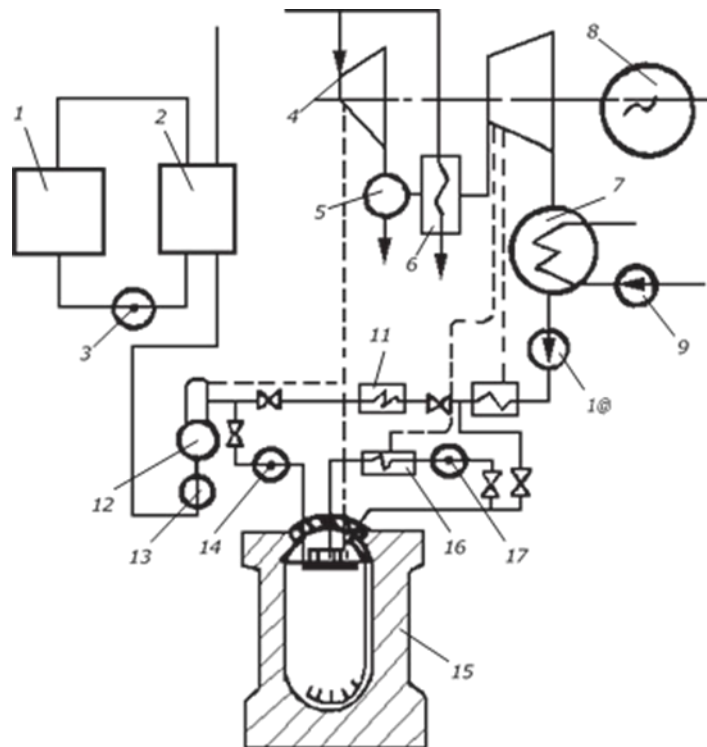


Рис. 4. Схема АЭС с АПВ низкого давления: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос реактора; 4 – паровая турбина; 5 – сепаратор; 6 – пароперегреватель; 7 – конденсатор; 8 – электронагреватель; 9 – циркуляционный насос системы охлаждения конденсатора; 10 – конденсатный насос; 11 – регенеративные подогреватели основного контура; 12 – деаэрактор; 13 – питательный насос; 14 – насос подачи горячей воды из АПВ в линию питательной воды; 15 – АПВ; 16 – регенеративные подогреватели пикового контура; 17 – циркуляционный насос АПВ

Принцип работы высокотемпературной ХТС следующий:

1. В период провала электрической нагрузки тепло от АЭС, которое в обычном режиме сбрасывается, используется для паровой конверсии метана. При этом метан взаимодействует с водяным паром с образованием синтез-газа, состоящего из водорода и оксида углерода.

2. Синтез-газ аккумулируется и хранится под давлением.

3. В период пиковых нагрузок синтез-газ подается в турбину, где происходит его расширение с выработкой электроэнергии.

Результаты исследования. На основе описанных решений использования тепловых аккумуляторов для АЭС предложена концепция использования теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР.

Тепловой аккумулятор предлагается использовать в качестве составной части ИЯУ МБИР. Концепция использования теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР определяется спецификой установки МБИР.

Основное назначение ИЯУ МБИР – обеспечение выполнения широкого спектра исследовательских и экспериментальных работ с использованием реакторного излучения, а также выработка электроэнергии [10].

Установка МБИР состоит из двух независимых петель, каждая из которых содержит трубопроводы и оборудование первого, второго и третьего контуров и контура САОТ, а также оборудование и трубопроводы вспомогательных систем. В первом и втором контурах, контуре САОТ в качестве теплоносителя используется натрий, третий контур – пароводяной [11].

Первый контур МБИР предназначен для отвода тепла с помощью натриевого теплоносителя от активной зоны (а.з.) реактора и передачи этого тепла в промежуточных теплообменниках (ПТО) второму контуру. Две симметричные петли, подключенные к корпусу реактора, отводят примерно по 50 % мощности. В каждой петле реакторной установки (РУ) содержится однотипный набор оборудования: ПТО, аварийный теплообменник (АТО), ГЦН-1, арматура и трубопроводы первого контура.

Второй контур предназначен для отвода тепла от первого контура и передачи его теплоносителю третьего контура в парогенераторах. Второй контур является дополнительным защитным барьером между радиоактивным натрием первого контура и пароводяным контуром турбины.

Третий контур обеспечивает выработку пара парогенератором и подачу его на турбоустановку. В проекте применена паровая турбина с электрогенератором.

В состав третьего контура входят: обратный парогенератор (ОПГ); паровая турбина; деаэрационная установка; конденсатор; трубопроводы пара и питательной воды с арматурой; трубопроводы конденсата, масла; подогреватели высокого давления (ПВД) и низкого давления (ПНД); трубопроводы и арматура [12].

Турбоагрегат является основным элементом третьего контура системы теплофикационной паротурбиной установки с вспомогательным оборудованием на ИЯУ МБИР. Принципиальная тепловая схема турбоагрегата приведена на рис. 5.

В состав паротурбинной установки входят: паровая турбина с системами регулирования и

смазки; конденсатор; трубопроводы турбоустановки с опорами и подвесками; система регенерации [13].

Для повышения эффективности использования электроэнергии, полученной от турбины, для ИЯУ МБИР предлагается следующая конструкция теплового аккумулятора.

Конструкция теплового аккумулятора состоит: из бака-разрядки, бака-зарядки, четырех насосов НТА, запорной арматуры на напоре и всасе насосов НТА. Схема конструкции теплового аккумулятора (ТА) для ИЯУ МБИР представлена на рис. 6.

На основе анализа существующих решений использования ТА для АЭС предложена концепция применения двухбакового аккумулятора с жидким теплоносителем для ИЯУ МБИР.

Принцип работы, способ аккумулирования и выбор теплоносителя. В основе предлагаемой концепции лежит аккумулирование явной теплоты (sensible heat storage) путем изменения температуры и объема жидкого теплоносителя. В качестве аккумулирующей среды в контуре теплового аккумулятора предлагается использовать нитратно-нитритную соль (например, $\text{NaNO}_3\text{-KNO}_3\text{-NaNO}_2$).

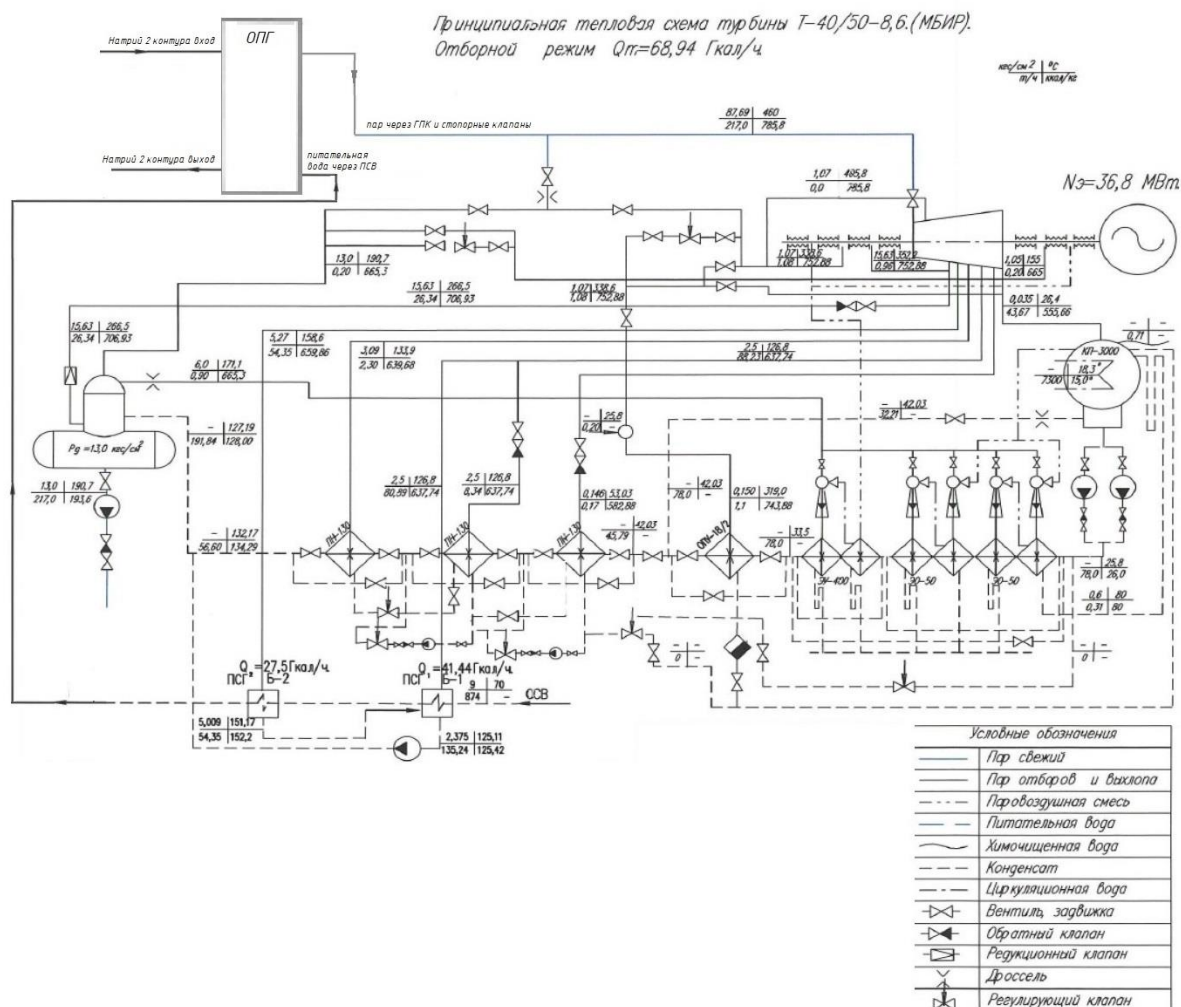


Рис. 5. Принципиальная тепловая схема турбоагрегата для ИЯУ МБИР

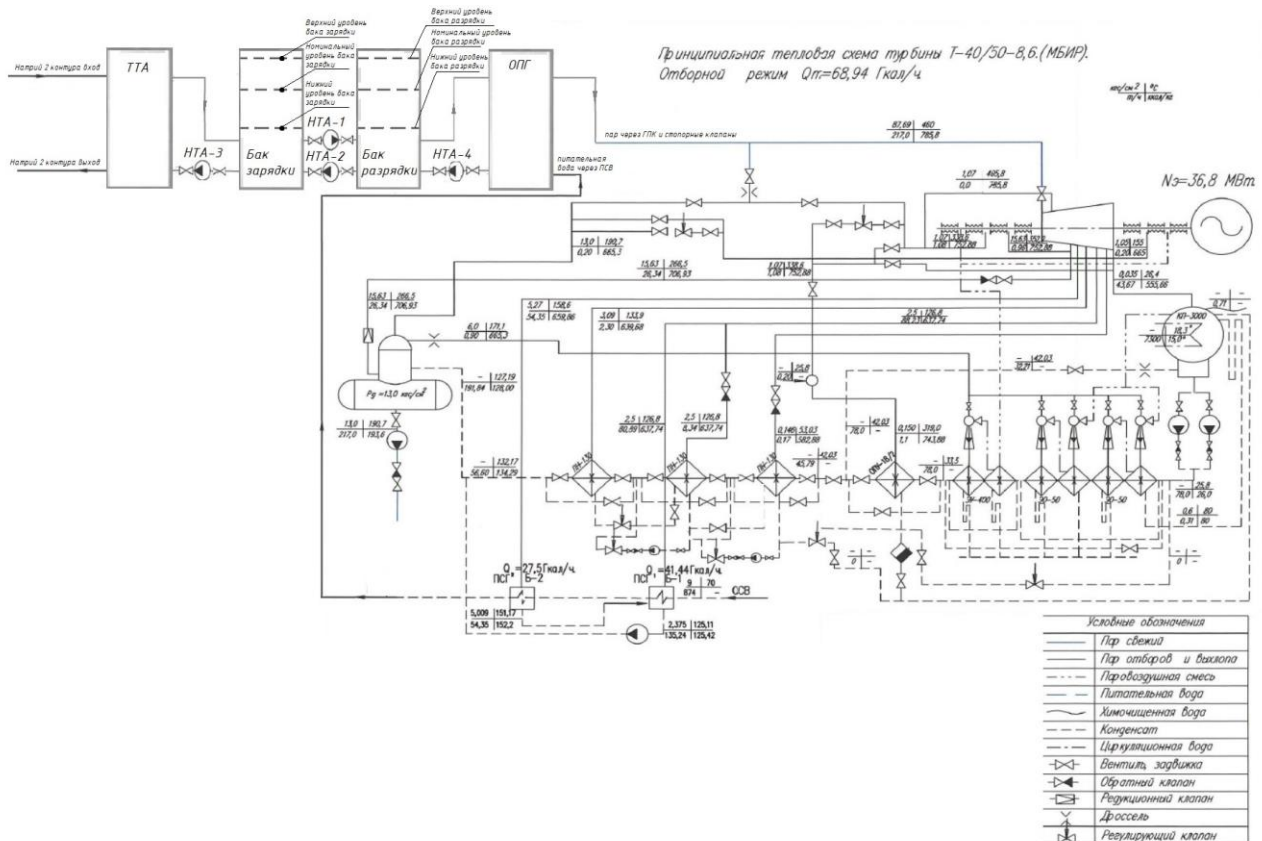


Рис. 6. Схема конструкции теплового аккумулятора для ИЯУ МБИР: ТТА – теплообменник теплового аккумулятора; НТА-1,2,3,4 – насос теплового аккумулятора 1,2,3,4

Выбор данного теплоносителя обусловлен следующими ключевыми характеристиками:

1) повышенной безопасностью. В отличие от натрия второго контура, нитратно-нитритные соли не вступают в интенсивную экзотермическую реакцию с водой или водяным паром. Это критически важно для исключения рисков при возможных взаимных протечках между контуром ТА и соседним пароводящим третьим контуром, что существенно повышает общую безопасность установки;

2) высокой теплоемкостью и возможностью работать в широком диапазоне температур (до 600°C), что обеспечивает высокую плотность аккумулируемой энергии и эффективную интеграцию с параметрами теплоносителя второго контура МБИР.

Ключевым элементом интеграции является теплообменник ТТА, который устанавливается в разрыв второго контура МБИР между ПТО и штатным парогенератором. Таким образом, контур ТА подключается последовательно между вторым и третьим контуром, становясь промежуточным звеном в цепи передачи тепла от реактора к пароводящему контуру турбины.

Принципиальная схема включения и работы предлагаемого ТА заключается в следующем (рис. 6):

1) натрий второго контура, нагретый в ПТО, поступает не напрямую в парогенератор, а

сначала в теплообменник ТТА контура теплового аккумулятора;

2) в теплообменнике ТТА тепло от натрия передается солевому теплоносителю контура ТА;

3) далее частично охлажденный натрий поступает в штатный парогенератор, где отдает оставшееся тепло пароводящему третьему контуру.

Подобная схема включения является целесообразной и реализуемой в силу следующих причин:

1) позволяет аккумулировать тепло напрямую от основного теплоносителя второго контура, не создавая параллельных потоков и не изменяя принципиальную тепловую схему парогенерации;

2) контур ТА выполняет функцию буферной (демпфирующей) системы, регулируя тепловую нагрузку на парогенератор;

3) наличие запорной арматуры позволяет в случае необходимости байпасировать (закольцевать) контур ТА, обеспечивая работу установки по исходной схеме.

Реализацию данного принципа обеспечивает детализация работы схемы и управление насосами:

1. **Режим зарядки.** Расход насоса НТА-4 увеличивается до $1,25 N_{ном}$, что обеспечивает усиленную подачу солевого теплоносителя через теплообменник ТТА и его нагрев. Одновременно расход насоса НТА-3 уменьшается до

0,75 $N_{\text{ном}}$, создавая разрежение в линии бака-зарядки и инициируя переток в него охлажденной соли. Тем самым в баке-зарядке устанавливается нижний уровень теплоносителя, а в баке-разрядке – верхний уровень. По достижении верхнего уровня в баке-разрядке, что сигнализирует о завершении цикла зарядки, расходы насосов НТА-3 и НТА-4 возвращаются к значениям, соответствующим мощности работы турбины в периоды низкого потребления. Расходы насосов НТА-1 и НТА-2 при этом поддерживаются в соответствии с заданной постоянной мощностью реактора.

2. *Режим разрядки.* Расход насоса НТА-3 увеличивается до 1,25 $N_{\text{ном}}$, обеспечивая подачу накопленной горячей соли из бака-разрядки в теплообменник ТТА. Расход насоса НТА-4 уменьшается до 0,75 $N_{\text{ном}}$, направляя охлажденную соль после отдачи тепла в бак-зарядки. Уровень в баке-разрядке понижается, а в баке-зарядке повышается. По достижении верхнего уровня в баке-зарядке (нижнего в баке-разрядке) расходы насосов НТА-3 и НТА-4 корректируются для поддержания мощности турбины в пиковом режиме.

3. *Номинальный режим.* Уровень солевого теплоносителя в обоих баках поддерживается на среднем номинальном уровне. Расходы всех насосов НТА-1,2,3,4 поддерживаются на номинальном уровне, обеспечивая стационарную работу установок без аккумуляирования.

Таким образом, в режиме зарядки ТА накапливает избыточное тепло от реактора, а в режиме разрядки – отдает накопленную энергию для повышения мощности турбины в пиковые часы, реализуя функцию полупикового регулятора нагрузки. Использование нитратно-нитритной соли в качестве теплоносителя контура ТА обеспечивает необходимое сочетание энергетической эффективности и повышенной эксплуатационной безопасности.

Выводы. Предложенная концепция использования ТА для ИЯУ МБИР позволяет более эффективно использовать тепловую энергию от реактора для работы турбины согласно графику нагрузок потребления и обеспечивает работу турбины в полупиковом режиме.

Концепция применения ТА может быть использована в дальнейшем и для отраслевых атомных электростанций с их относительно жесткими ограничениями по маневренности. Применение ТА для отраслевых АЭС позволяет также обеспечить резерв энергии в случае внезапного прекращения работы энергоблоков АЭС, особенно на период запуска резервных установок.

Список литературы

1. Глазков В.В., Синкевич О.А., Чикунов С.Е. Подземные водяные тепловые аккумуляторы для АЭС – новые перспективы // Вестник МЭИ. – 2011. – № 3. – С. 23–24.

2. Копкова Е.С., Иманова Х.Г. Атомная энергетика России: современное состояние, проблемы и перспективы развития отрасли в условиях цифровой экономики // Проблемы региональной экономики. – 2018. – № 42. – С. 3–26.

3. Фортков В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. – М.: Интеллект, 2011. – С. 25–30.

4. Асмолов В.Г. Российская ядерная энергетика сегодня и завтра // Теплоэнергетика. – 2007. – № 5. – С. 2–6.

5. Бажанов В.В., Лощаков И.И., Щуклинов А.П. Исследование возможности использования на АЭС аккумуляторов тепловой энергии при регулировании частоты тока в сети // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 29–36.

6. Бабаев Б.Д. Принципы теплового аккумуляирования и используемые теплоаккумулирующие материалы // Теплофизика высоких температур. – 2014. – Т. 52, № 5. – С. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019.

7. Лебедев В.А., Деев А.С., Ступкин А.Д. АЭС малой мощности с аккумулятором теплоты фазового перехода // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 19–27. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027.

8. Бекман Г., Гилли П. Тепловое аккумуляирование энергии: пер. с англ. / под ред. В.М. Бродянского. – М.: Мир, 1987.

9. Столяревский А.Я. Хемотермические циклы и установки аккумуляирования энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2005. – № 3(23). – С. 45–58.

10. Многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) – инновационный инструмент для развития ядерных энерготехнологий / Ю.Г. Драгунов, И.Т. Третьяков, А.В. Лопаткин и др. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 113, вып. 1. – С. 25–28.

11. Исследовательские реакторы – взгляд в будущее / Б.А. Габараев, А.В. Лопаткин, И.Т. Третьяков и др. // Атомная энергия. – 2007. – Т. 103, вып. 1. – С. 65–70.

12. Нейтронно-физические особенности проектирования МБИР / И.В. Зайко, М.О. Левченко, А.В. Лопаткин и др. // Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. – М.: ОАО «НИКИЭТ», 2012. – С. 187–194.

13. Нейтронно-физические особенности активной зоны МБИР / И.В. Зайко, М.О. Левченко, А.В. Лопаткин // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, вып. 4. – С. 188–192.

References

1. Glazkov, V.V., Sinkevich, O.A., Chikunov, S.E. Podzemnye vodyanye teplovyie akkumulyatory dlya AES – novye perspektivy [Underground water heat accumulators for nuclear power plants – new prospects]. *Vestnik MEI*, 2011, no. 3, pp. 23–24.

2. Koptkova, E.S., Imanova, Kh.G. Atomnaya energetika Rossii: sovremennoe sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya otrasli v usloviyakh tsifrovoy ekonomiki [Nuclear energy in Russia: current state, problems and prospects for the development of the industry in the context of the digital economy]. *Problemy regional'noy ekonomiki*, 2018, no. 42, pp. 3–26.

3. Fortov, V.E., Popel', O.S. *Energetika v sovremennom mire* [Energy in the modern world]. Moscow: Intellekt, 2011, pp. 25–30.

4. Asmolov, V.G. Rossiyskaya yadernaya energetika segodnya i zavtra [Russian nuclear energy today and tomorrow]. *Teploenergetika*, 2007, no. 5, pp. 2–6.

5. Bazhanov, V.V., Loshchakov, I.I., Shchuklinov, A.P. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya na AES akkumulyatorov teplovoy energii pri regulirovani chasty toka v seti [Study of the possibility of using thermal energy accumulators at nuclear power plants when regulating the frequency of the current in the network]. *Izvestiya vysokikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2013, no. 4, pp. 29–36.

6. Babaev, B.D. Printsipy teplovogo akkumulirovaniya i ispol'zuemye teploakkumuliruyushchie materialy [Principles of thermal storage and heat storage materials used]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 2014, vol. 52, no. 5, p. 760. DOI: 10.7868/S0040364414050019.

7. Lebedev, V.A., Deev, A.S., Stupkin, A.D. AES maloy moshchnosti s akkumulyatorom teploty fazovogo perekhoda [Low-power nuclear power plant with phase transition heat accumulator]. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 19–27. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027.

8. Bekman, G., Gilli, P. *Teplovoe akkumulirovanie energii* [Thermal energy storage]. Moscow: Mir, 1987.

9. Stolyarevskiy, A.Ya. Khimotermicheskie tsikly i ustanovki akkumulirovaniya energii [Chemothermic cycles and energy storage units]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"*, 2005, no. 3(23), pp. 45–58.

10. Dragunov, Yu.G., Tret'yakov, I.T., Lopatkin, A.V., Romanova, N.V., Lukasevich, I.B. Mnogotselovoy bystryy

issledovatel'skiy reaktor (MBIR) – innovatsionnyy instrument dlya razvitiya yadernykh energotekhnologiy [Multi-purpose fast research reactor (MBIR) – an innovative tool for the development of nuclear energy technologies]. *Atomnaya energiya*, 2012, vol. 113, issue 1, pp. 25–28.

11. Gabaraev, B.A., Lopatkin, A.V. Tret'yakov, I.T., Khmel'shchikov, V.V., Aksenov, V.L. Issledovatel'skie reaktory – vzglyad v budushchee [Research Reactors – A Look into the Future]. *Atomnaya energiya*, 2007, vol. 103, issue 1, pp. 65–70.

12. Zayko, I.V., Levchenko, M.O., Lopatkin, A.B., Lukasevich, I.B., Rodina, E.A., Romanova, N.V., Tret'yakov, I.T. Neytronno-fizicheskie osobennosti proektirovaniya MBIR [Neutron-physical features of MBIR design]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Innovatsionnye proekty i tekhnologii yadernoy energetiki»* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference “Innovative Projects and Technologies of Nuclear Energy”]. Moscow: OAO «NIKIET», 2012, vol. 1, pp. 187–194.

13. Zayko, I.V., Levchenko, M.O., Lopatkin, A.B., Lukasevich, I.B., Rodina, E.A., Romanova, N.V., Tret'yakov, I.T. Neytronno-fizicheskie osobennosti aktivnoy zony MBIR [Neutron-physical features of the MBIR active zone]. *Atomnaya energiya*, 2013, vol. 114, issue 4, pp. 188–192.