

УДК 621.039.58

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АККУМУЛЯТОРОВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ НА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ТРЕХКОНТУРНОГО ТИПА

¹Ростунцова И.А., ²Шевченко Н.Ю., ¹Коломеец А.С.¹ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет
имени Ю.А. Гагарина», Саратов;²ФГБОУ ВПО Камышинский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО Волгоградский
государственный технический университет, Камышин, e-mail: kti@kti.ru

В статье рассматривается возможность использования атомных электростанций для покрытия пиковой части графика электрических нагрузок энергосистемы. Представлены схемные решения по возможности использования на атомных электростанциях аккумуляторов теплоты для покрытия переменных графиков электрических нагрузок энергосистемы. Разработана тепловая схема трехконтурной атомной электростанции с аккумулирующим (пиковым) контуром. Определена техническая эффективность включения в тепловую схему атомных электростанций с блоками БН-800 и турбоустановкой К-800-130 аккумулятора фазового перехода (АФП) с натриевым теплоносителем с целью получения дополнительной электрической мощности при сохранении номинальных параметров реакторной установки и парогенератора основной тепловой схемы. Данное решение повышает надежность эксплуатации атомных электростанций с блоками БН-800 и аккумулирующим контуром.

Ключевые слова: схемные решения, аккумулятор фазового перехода, теплоаккумулирующий материал, дополнительная электрическая мощность

THE EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF ACCUMULATORS PHASE TRANSITION WITH SODIUM COOLANT IN NUCLEAR POWER PLANTS WITH THREE CONTOURS

¹Rostovtseva I.A., ²Shevchenko N.J., ¹Kolomoets A.S.¹FGBOU Saratov State Technical University, Saratov;²Kamyshin Institute of Technology (branch) of state educational institution of higher professional
Education Volgograd State Technical University, Kamyshin, e-mail: kti@kti.ru

The article considers the possibility of using nuclear power plants to cover peak electrical loads of the chart grid. The article examines the schematics of possible use in nuclear power plants heat accumulators to cover the variable schedules electrical power system loads. Developed three-loop thermal circuit with an accumulation of NPP (peak) circuit. To determine the technical efficiency of the thermal scheme of nuclear power units with bn-800 and the turbo K-800-130 battery phase transition (AFP) with sodium coolant for the purpose of obtaining additional electrical power while maintaining the nominal parameters of the reactor core and steam generator heat circuit. This solution increases the reliability of operation of nuclear power units with bn-800 and the accumulating circuit.

Keywords: circuit solutions, the battery of the phase transition, heat storage material, additional electrical power

Одной из наиболее острых проблем энергетики является проблема покрытия неравномерности графиков суточного, недельного и сезонного электропотребления [1]. К числу перспективных путей решения проблемы повышения маневренности генерирующего оборудования энергосистемы можно отнести использование теплоаккумулирующих систем на традиционно маломаневренных электростанциях, таких как АЭС, АТЭ, ТЭЦ с повышенной теплофикационной нагрузкой, ТЭС, использующих твердое топливо [2]. Тепловое аккумулирование энергии на электростанциях позволяет уменьшить капиталовложения в энергосистеме на сооружение специализированных высокоманевренных установок, а при высокой эффективности теплоаккумулирующего цикла – и экономить топливо, потребляемое специализированны-

ми установками. Кроме этого, одновременно повышается надежность электростанции, так как на ней значительную часть суток (кроме часов стояния пиковых нагрузок) имеется готовый к быстрому вводу в работу пиковый контур [3]. Поэтому применение системы аккумулирования теплоты на тепловых электростанциях и в частности на АЭС является актуальной задачей в плане использования атомных электростанций в широком диапазоне электрических нагрузок.

Аккумулирование тепловой энергии

Аккумулирование тепловой энергии представляет собой процесс накопления тепловой энергии в период ее наибольшего поступления для последующего использования, при этом в процессе накопления энергии производится зарядка аккумуля-

тора, а в процессе ее использования – разрядка. Возможность аккумулирования тепловой энергии основана на использовании физического или химического процесса, связанного с поглощением и выделением теплоты. К основным из них относятся:

- накопление-выделение внутренней энергии при нагреве-охлаждении твердых или жидких тел;
- фазовые переходы с поглощением-выделением скрытой теплоты;
- процесс сорбции-десорбции или обратимая химическая реакция, протекающая с выделением-поглощением тепла.

Отмеченные процессы реализуются в специальных устройствах – аккумуляторах теплоты (АТ). Вещества, используемые для накопления тепловой энергии, называются теплоаккумулирующими материалами (ТАМ). При этом количество аккумулированной энергии зависит от температуры, на которую нагревается ТАМ, и его удельной теплоемкости.

Наибольшее распространение получили аккумуляторы фазового перехода (АФП) с промежуточным теплоносителем, который представляет собой газ или жидкость, осуществляющий перенос теплоты от источника к АФП, при его зарядке, и от АФП к потребителю, при разрядке.

Одним из таких АФП является аккумулятор капсульного типа, схема которого представлена на рис. 1.

Он состоит из корпуса, заполненного специальными капсулами, которые, в свою

очередь, заполнены теплоаккумулирующими материалами. Подвод или отвод теплоты в АФП производится посредством теплоносителя, проходящего в пространстве между капсулами.

Основным достоинством таких аккумуляторов является простота конструкции и возможность гибкого выбора компоновочных решений, поскольку капсулами с ТАМ могут заполняться контейнеры произвольной формы.

Оценка эффективности применения аккумулятора фазового перехода с натриевым теплоносителем

Для АЭС трехконтурного типа с реакторными установками типа БН 800 и турбоустановкой К-800-130 рассмотрена эффективность применения аккумулятора фазового перехода, где в качестве ТАМ используется жидкий натрий. Разработана тепловая схема блока с включением аккумулирующего контура (рис. 2).

На выходе из АФП, образовавшийся конденсат, подается на слив в основной деаэрактор, тем самым восполняя расход рабочего тела в цикле до номинального значения D_0 . Процесс зарядки происходит до тех пор, пока АЭС работает на пониженной нагрузке. Как только нагрузка станции выравнивается до номинального значения, клапаны 1 и 2 закрываются, зарядка прекращается. В тот момент, когда нагрузка начинает превышать номинальное значение (в часы пик), открываются клапаны 3 и 4, начинается разрядка аккумулятора.

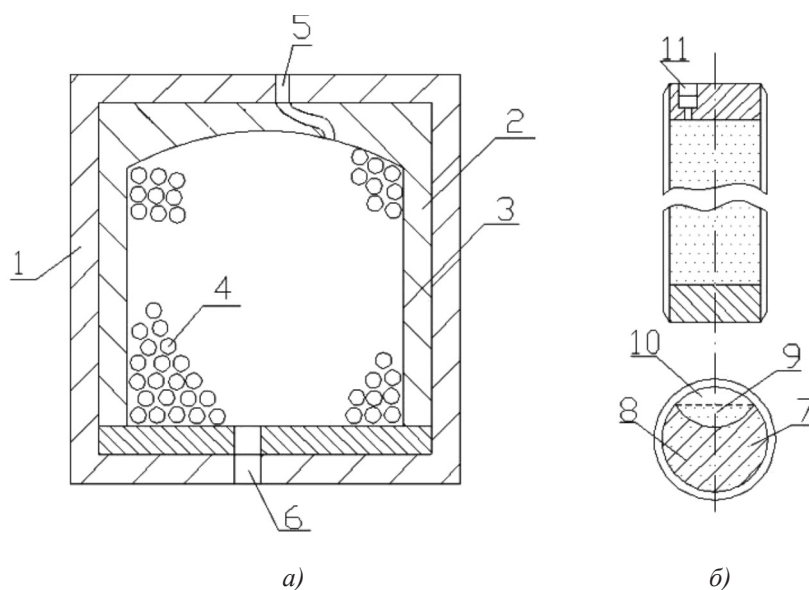


Рис. 1. Схема аккумулятора фазового перехода (а) и цилиндрическая капсула (б). 1 – корпус АФП; 2 – тепловая изоляция; 3 – внутренний сосуд; 4 – теплоаккумулирующие капсулы; 5 – вход/выход пара; 6 – вход/выход воды; 7 – расплавленный металл; 8 – кристаллизованный металл; 9 – полость кристаллизованного металла; 10 – полость расплавленного металла; 11 – пробка

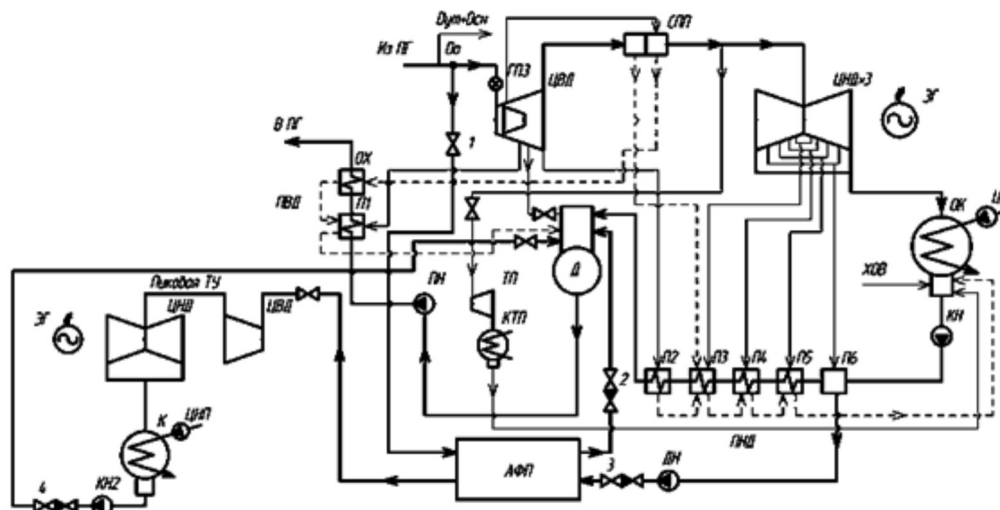


Рис. 2. Принципиальная схема включения аккумулирующего контура в тепловую схему

Дренажный насос (ДН) отбирает необходимую часть основного конденсата, которая уже предварительно частично дегазируется в смешивающем подогревателе П 6. Далее насос закачивает конденсат в АФП, где происходит теплообмен и испарение конденсата. Из АФП выходит пар с номинальными для пиковой турбины параметрами. В турбине пар расширяется, и, образовавшийся в конденсаторе конденсат, прокачивается конденсатным насосом КН2, который, в свою очередь, формирует параметры, необходимые для входа конденсата в основной деаэрактор. Так происходит до тех пор, пока, либо не снизится нагрузка на станции до номинального значения, либо полностью не разрядится аккумулятор. В данной схеме процесс аккумулирования организован таким образом, чтобы сохранялся номинальный режим работы парогенератора и реакторной установки, что повышает надежность эксплуатации тепловой схемы АЭС.

Таблица 1
Исходные данные для расчета
пикового контура

Наименование	Значение
Относительная электрическая нагрузка блока с БН-800	0,9
Номинальный расход пара, кг/с	910,49
Начальное давление, МПа	12,75
Начальная температура, °С	485
КПД теплового потока	0,99
Удельная теплоёмкость воды, кДж/(кг·°С)	4,19
Давление насыщения в П6, МПа	0,022
Число часов работы АЭС на пониженной нагрузке, ч/год	2832

Для оценки эффективности включения аккумулирующего пикового контура приняты следующие исходные данные, представленные в табл. 1.

Принято, что разгрузка блока по электрическому графику составляет 10% ($\varphi = 0,9$). Нагрузка, которая приходится на АФП составит: $1 - \varphi = 1 - 0,9 = 0,1$.

Расход и давление пара на входе в пиковый контур определяются из выражений (при условии сохранения начальной температуры на уровне $t_{от}^{афп} = t_0^n = 485^\circ\text{C}$):

$$D_{от}^{афп} = (1 - \varphi) \cdot D_0^n; \quad (1)$$

$$P_{от}^{афп} = (1 - \varphi) \cdot P_0^n, \quad (2)$$

где D_0^n – номинальный расход пара из парогенератора, кг/с;

P_0^n – начальное давление пара на входе в турбину при номинальном режиме.

Произведен выбор пиковой турбоустановки, исходя из количества теплоты, получаемой аккумулятором в период зарядки $Q_{зар}$; количества теплоты, получаемой рабочим телом от аккумулятора в период разрядки $Q_{раз}$ и дополнительной электрической мощности, вырабатываемой пиковым контуром $N_{доп}$. Последние принимают значения из выражений:

$$Q_{зар} = D_{от}^{афп} \cdot (h_{от}^{афп} - h_в^{афп}) \cdot \eta_{п.зар}, \quad (3)$$

$$Q_{раз} = Q_{зар} \cdot \eta_{п.раз}, \quad (4)$$

$$N_{доп} = Q_{раз} \cdot \eta_{ф.ту} \quad (5)$$

где $\eta_{зар} = 0,85$ – коэффициент, учитывающий эффективность передачи тепла жидкометаллическому теплоносителю (принят по данным [3]);

$\eta_{зар} = 0,93$ – коэффициент, учитывающий эффективность передачи тепла от жидко-металлического теплоносителя (принят по данным [4]);

$\eta_{п} = 0,99$ – КПД подогревателя;

$\eta_{эф.ту} = 0,36$ – эффективный КПД среднестатистической турбоустановки; $h_{от}^{афп}$; $h_{в}^{афп}$ – энтальпии пара и дренажа АФП, кДж/кг.

По полученным данным к установке принята пиковая турбина марки К-80-7,0, характеристики которой представлены в табл. 2.

Параметры контура АФП определяются на основании материально-тепловых балансов. Продолжительность работы АЭС на пониженной нагрузке в среднем составляет 2832 часа в год, т.е. $T_{пол} = 2832$ ч/год = 236 ч/мес = 59 ч/нед = 2,46 сут/нед. При этом максимальное значение электроэнергии, выработанной за счёт использования аккумулированной теплоты, составит:

$$Э_{выр}^{пик} = N_3^{доп} \cdot T_{зар}^{нед} = 68 \cdot 59 = 4012 \text{ МВт} \cdot \text{ч}.$$

Результаты по оценке эффективности аккумулирующего контура представлены в табл. 3.

Таблица 2

Характеристики турбоустановки К-80-7,0 для пикового контура

Наименование	Значение
Начальное давление, МПа	6,96
Начальная температура, °С	508,0
Расход свежего пара, т/ч	223,5
Номинальная температура охлаждающей воды, °С	17
Расход охлаждающей воды через конденсатор, м³/ч	17500

Таблица 3

Результаты расчёта аккумулирующего контура

Наименование	Значение
Расход отбираемого пара на зарядку аккумулятора, кг/с	91,05
Расход отбираемого конденсата на разрядку аккумулятора, кг/с	62,08
Зарядка аккумулятора	
Параметры отбираемого пара на вход в АФП:	
Давление, МПа	1,28
Температура, °С	485
Параметры дренажа на выходе из АФП:	
Давление, МПа	1,04
Температура, °С	181,6
Разрядка аккумулятора	
Параметры отбираемого конденсата из Пб:	
Давление, МПа	0,022
Температура, °С	62,1
Параметры конденсата после дренажного насоса, на входе в АФП:	
Давление, МПа	8,62
Температура, °С	65,1
Параметры пара на входе в пиковую турбоустановку:	
Давление, МПа	6,96
Температура, °С	508
Параметры конденсата в «пиковом» конденсаторе:	
Давление, МПа	0,0046
Температура, °С	31,3
Параметры конденсата на входе в основной деаэрактор:	
Давление, МПа	0,96
Температура, °С	32,1
Продолжительность зарядки аккумулятора в неделю, ч	59
Количество тепла, идущее в пиковую турбоустановку, МВт	188,62
Мощность, вырабатываемая пиковой турбоустановкой, МВт	68
Дополнительная электроэнергия, вырабатываемая в пиковой ТУ, МВт·ч	4012

Выводы

1. Разработана схема блока АЭС трехконтурного типа с реактором БН-800 и турбоустановкой К-800-130 и с включением аккумулирующего контура с аккумулятором фазового перехода и пиковой турбоустановкой для получения дополнительной электрической мощности.

2. Рассчитана эффективность аккумулирующего пикового контура на предмет целесообразности его включения в основную тепловую схему блока.

3. Применение аккумуляторов тепловой энергии (АФП) на блоке позволяет получить дополнительную выработку электроэнергии в часы пиковой нагрузки, при сохранении номинального режима работы

реакторной установки, что положительно сказывается на надёжности работы.

Список литературы

1. Оценка эффективности энергоблоков АЭС при покрытии переменной части графика электрических нагрузок / И.А. Ростунцева, Н.Ю. Шевченко // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 9–3. – С. 474–479.

2. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции / В.Я. Рыжкин. – М.: Энергия, 1976. – 448 с.

3. Онищенко В.Я. Тепловое аккумулирование энергии на электростанциях. Основы аккумулирования. Учеб. пособие / Онищенко В.Я. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 1995. – 84 с.

4. Онищенко В.Я. Тепловое аккумулирование энергии на электростанциях. Основы технико-экономического анализа. Учеб. пособие / Онищенко В.Я. – Саратов: Изд-во Сарат. гос. техн. ун-та, 1995. – 88 с.