

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ НА АЭС

Я.А. Федосенко*, И.А. Ростунцова*

** Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, rostunzeva@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрена возможность использования атомных электростанций для покрытия пиковой части графика электрических нагрузок энергосистемы. Разработана тепловая схема трехконтурной атомной электростанции с аккумуляющим (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.

Ключевые слова: аккумулятор фазового перехода, теплоаккумулирующий материал, дополнительная электрическая мощность, натриевый теплоноситель

FUTURE DIRECTIONS THERMAL ENERGY STORAGE AT NUCLEAR POWER PLANTS

J.A. Fedosenko *, I.A. Rostuntsova*

** Yuri Gagarin state technical university of Saratov,
Saratov, Russia, rostunzeva@mail.ru*

Annotation. The possibility of using nuclear power plants to cover peak electrical loads of the chart grid. Developed scheme of three-loop thermal nuclear power plant with an accumulation (peak) circuit. To determine the technical efficiency of inclusion in the thermal circuit of nuclear power plants with units BN-800 and K-800-130 turbine battery phase transition (AFP) sodium cooled to produce additional electrical power, while maintaining the nominal parameters of the reactor plant and the main steam generator thermal circuit.

Keywords: battery phase transition heat storage material, additional electrical power, sodium coolant.

Одной из наиболее острых проблем энергетики является проблема покрытия неравномерности графиков суточного, недельного и сезонного электропотребления. 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 [1]. Тепловое аккумулярование энергии на электростанциях позволяет уменьшить капиталовложения в энергосистеме на сооружение специализированных высокоманевренных установок, а при высокой эффективности теплоаккумулирующего цикла - и экономить топливо, потребляемое специализированными 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 [2-3]. Поэтому применение системы аккумулярования теплоты на тепловых электростанциях и в частности на АЭС является актуальной задачей в плане использования атомных электростанций в широком диапазоне электрических нагрузок.

Аккумулярование тепловой энергии представляет собой процесс накопления тепловой энергии в период ее наибольшего поступления для последующего использования, при этом в процессе накопления энергии производится зарядка аккумулятора, а в процессе ее использования - разрядка. Возможность аккумулярования 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.

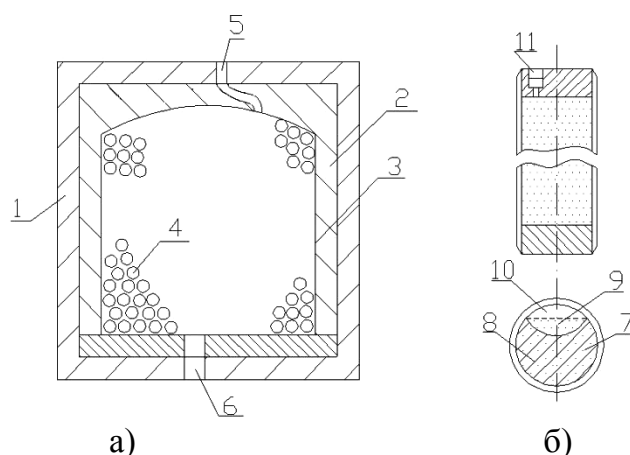


Рис.1. Схема аккумулятора фазового перехода (а) и цилиндрическая капсула (б)

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.

Он состоит из корпуса, заполненного специальными капсулами, которые, в свою очередь, заполнены теплоаккумулирующими материалами (ТАМ). 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.

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 деаэратор, тем самым восполняя расход рабочего тела в цикле до номинального значения D_0^n . 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.

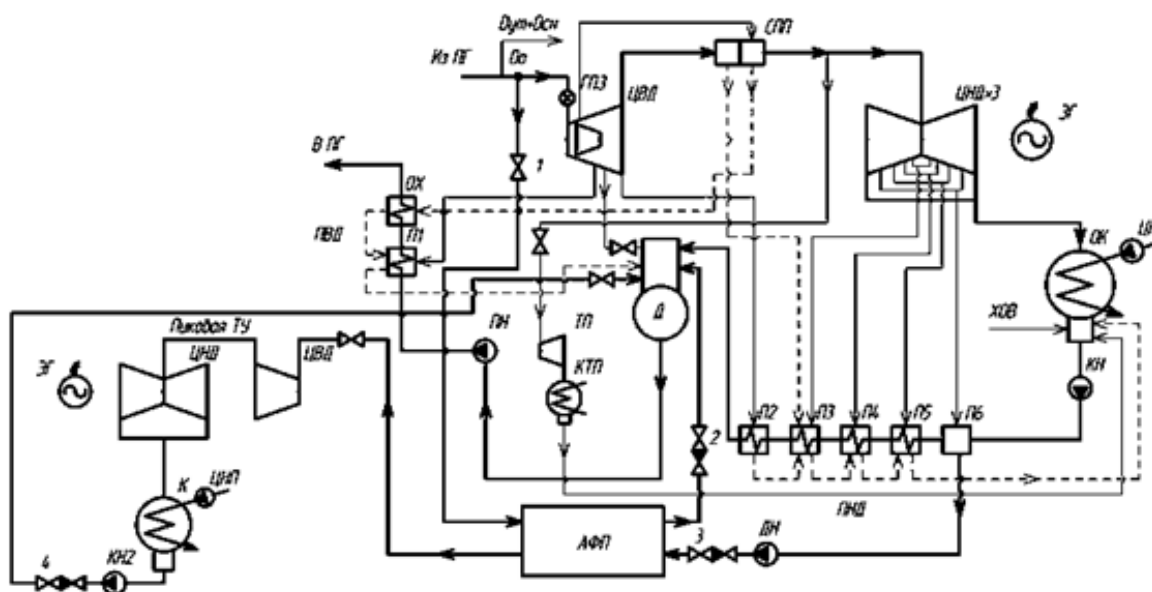


Рис. 2. Принципиальная схема включения аккумулярующего контура в тепловую схему

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 деаэратор. Так происходит до тех пор, пока, либо не снизится нагрузка на станции до номинального значения, либо полностью не разрядится аккумулятор. В данной схеме процесс аккумулярования организован таким образом, чтобы сохранялся номинальный режим работы парогенератора и реакторной установки, что повышает надежность эксплуатации тепловой схемы АЭС.

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

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 ПБ, МПа	0,022
Число часов работы АЭС на пониженной нагрузке, ч/год	2832

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 $t_{от}^{афп} = t_0^н = 485 \text{ }^\circ\text{C}$):

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

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

где $D_0^н$ – номинальный расход пара из парогенератора, кг/с; $P_0^н$ – 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, $N_э^{доп}$. Последние принимают значения из выражений:

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

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

$$N_э^{доп} = Q_{раз} \cdot \eta_{эф.ту} \quad (5)$$

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

$\eta_{раз} = 0,93$ – коэффициент, учитывающий эффективность передачи тепла от жидкометаллического теплоносителя (принят по данным [3]);

$\eta_{п} = 0,99$ – 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.

Таблица 2. Характеристики турбоустановки К-80-7,0 для пикового контура

Наименование	Значение
Начальное давление, МПа	6,96
Начальная температура, $^\circ\text{C}$	508,0
Расход свежего пара, т/ч	223,5
Номинальная температура охлаждающей воды, $^\circ\text{C}$	17
Расход охлаждающей воды через конденсатор, м ³ /ч	17500

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

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

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

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 деаэратор:	
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

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

Библиографический список

1. Рыжкин В.Я. Тепловые электрические станции. М.: Энергия, 1976. 448 с.
2. Онищенко В.Я. Тепловое аккумулирование энергии на электростанциях. Основы аккумулирования. Учеб. пособие / Онищенко В. Я. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-т., 1995. 84 с.
3. Онищенко В.Я. Тепловое аккумулирование энергии на электростанциях. Основы технико-экономического анализа. Учеб. пособие / Онищенко В. Я. Саратов: Изд-во Саратов. гос. техн. ун-т., 1995. 88 с.