

УДК 621.311.22

Владимир Александрович Лебедев

Санкт-Петербургский горный университет, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплотехники и теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: lebedev_va@spmi.ru

Андрей Сергеевич Деев

Санкт-Петербургский горный университет, аспирант кафедры теплотехники и теплоэнергетики, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: andy-deev@yandex.ru

Алексей Дмитриевич Ступкин

ООО «ГЦЭ-энерго», специалист отдела энергоаудита ТЭС, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: alexey.stupkin@mail.ru

АЭС малой мощности с аккумулятором теплоты фазового перехода

Авторское резюме

Состояние вопроса. АЭС, как источники энергоснабжения, характеризуются низкой маневренностью. Данный факт обостряет проблему баланса генерируемой и потребляемой мощности в энергосистеме при использовании АЭС в качестве источника энергии. Данная проблема особенно актуальна для изолированных энергосистем. Одним из способов повышения маневренности АЭС является использование аккумуляторов теплоты непосредственно в схеме АЭС.

Материалы и методы. Исследование проведено для двух наиболее привлекательных вариантов включения аккумулятора теплоты в схему АЭС: 1) параллельно подогревателю высокого давления для нагрева питательной воды; 2) для генерации дополнительного пара для цилиндра низкого давления. Эффективность каждого из вариантов определена на основании расчета тепловых схем АЭС с аккумулятором теплоты.

Результаты. Произведены расчеты мощности турбоустановки и выработки электроэнергии при включении аккумулятора теплоты в схему АЭС. Анализ полученных данных показывает, что при включении аккумулятора теплоты в схему АЭС параллельно ПВД для нагрева питательной воды мощность турбоустановки в режиме разряда аккумулятора была увеличена на 7,2 %, дополнительная выработка электроэнергии за счет аккумулированной теплоты составила 0,63 МДж на каждый килограмм сбросного пара; при использовании аккумулятора теплоты для генерации дополнительного пара для цилиндра низкого давления мощность турбоустановки в режиме разряда аккумулятора была увеличена на 6,6 %, дополнительная выработка электроэнергии за счет аккумулированной теплоты составила 0,40 МДж на каждый килограмм сбросного пара.

Выводы. Применение аккумуляторов теплоты в схемах АЭС позволит использовать аккумулированную теплоту для выработки дополнительной электроэнергии в часы повышенного спроса. Таким образом, использование аккумуляторов теплоты в схемах АЭС является способом повышения маневренности АЭС, снижения негативного влияния маневренных режимов на оборудование АЭС, снижения количества жидких радиоактивных отходов. Наиболее эффективным и простым вариантом применения аккумулятора теплоты в схеме АЭС является вариант с включением аккумулятора параллельно подогревателям высокого давления. В дальнейшем планируется определение конструкции аккумулятора теплоты и моделирование теплообменных процессов в нем.

Ключевые слова: АЭС малой мощности, аккумулятор теплоты, материалы с фазовым переходом, ВВЭР, суточный график потребления энергии

Vladimir Aleksandrovich Lebedev

Saint Petersburg Mining University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Professor, Head of Heating Engineering and Thermal Power Engineering Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: lebedev_va@spmi.ru

Andrey Sergeevich Deev

Saint Petersburg Mining University, Post-graduate Student of Heating Engineering and Thermal Power Engineering Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: andy-deev@yandex.ru

Aleksei Dmitrievich Stupkin

LLC «CCE-energy», Specialist of Thermal Power Plant Energy Audit Department, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: alexey.stupkin@mail.ru

Low-power NPP with heat accumulator with phase change material

Abstract

Background. Nuclear power plants (NPP) are characterized by low maneuverability. This fact exacerbates the problem of the balance of generated and consumed power when nuclear power plants are used as an energy source. This problem

is especially relevant for isolated power systems. One of the ways to increase the maneuverability of nuclear power plants is to use heat accumulators directly in the NPP circuit.

Materials and methods. The study is carried out for two most attractive options of including a heat accumulator in the NPP circuit: 1) parallel to a high-pressure heater to heat feed water; 2) to generate additional steam for a low-pressure cylinder. The efficiency of each of the options is determined based on the calculation of thermal schemes of nuclear power plants with a heat accumulator.

Results. The authors have calculated the power of the turbine unit and electricity generation when a heat accumulator is included in the nuclear power plant circuit. The analysis of the data obtained shows that when using a heat accumulator in the NPP circuit in parallel with high pressure heater to heat feed water, the power of the turbine unit is increased by 7,2 % in the accumulator discharge mode, and additional electricity generation due to accumulated heat is 0,63 MJ for each kilogram of waste steam. When using a heat accumulator to generate additional steam for a low-pressure cylinder, the power of the turbine unit is increased by 6,6 % in the accumulator discharge mode, and the additional power generation due to the accumulated heat is 0,40 MJ per kilogram of waste steam.

Conclusions. Application of heat accumulators in the NPP circuits will allow using the accumulated heat to generate additional electricity during high demand hours. Thus, the use of heat accumulators in NPP circuits is a way to increase the maneuverability of nuclear power plants, to reduce the negative impact of maneuverable modes on NPP equipment, and to reduce the number of liquid radioactive waste. The most effective and simple way to use the heat accumulator in the NPP circuit is to install it in parallel to the high-pressure heaters. In future, it is planned to determine the design of the heat accumulator, to model heat exchange processes in the heat accumulator.

Key words: Low-power NPP, heat accumulator, phase change material, PWR, daily energy consumption schedule

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.019-027

Введение. Одно из наиболее перспективных и активно развивающихся направлений в энергетике – атомная энергетика, в том числе ядерные энергетические установки (ЯЭУ) малой мощности [1, 2]. Так, согласно прогнозам МАГАТЭ, объемы электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, будут увеличиваться вплоть до 2050 года, что обусловлено вводом в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС [2, 3]. Наибольшим распространением и перспективами характеризуются реакторы типа ВВЭР [2, 3].

АЭС с реакторами ВВЭР имеют ряд ограничений с точки зрения скорости и количества циклов изменения нагрузки [4]. При этом маневренный режим работы АЭС с ВВЭР не обеспечивает 100 %-ной безопасности работы АЭС, является причиной увеличения термических и термо-механических нагрузок на материалы активной зоны и оборудование. При работе в маневренных режимах снижается эффективная длительность кампании энергоблока [4], увеличивается количество жидких радиоактивных отходов (следствие более интенсивного борного регулирования) [6], также увеличивается неравномерность выгорания топлива [7].

Большинство АЭС работает в базовой части графиков электрических нагрузок [1, 8], их работа в переменных режимах в течение суток с покрытием максимумов нагрузок и прохождением минимумов не подразумевается [1, 9]. При этом суточные графики потребления электрической энергии характеризуются значительной неравномерностью [1, 10]. Таким образом, в условиях преобладания доли АЭС в суммарной установленной мощности источников в энергосистемах обостряется проблема дефицита пиковых высокоманевренных мощностей [11]. Так, например, в странах ЕС, где в 2019 году около 30 % электроэнергии вырабатывалось на АЭС [12], АЭС привлекаются к суточному регулированию [9].

Описанная проблема особенно актуальна для АЭС малой мощности в изолированных удаленных энергосистемах. В таких энергосистемах наиболее остро стоит проблема баланса генерируемой и потребляемой мощностей в условиях ограниченного числа источников и потребителей электроэнергии [13–15]. Для АЭС малой мощности предъявляется ряд требований, помимо требований, предъявляемых к АЭС в целом. В частности, АЭС малой мощности должны обладать: повышенными маневренностью и безопасностью, максимальной длительностью кампании, низким количеством радиоактивных отходов или их отсутствием [16].

Таким образом, стоит задача разработки способа безопасного и эффективного повышения маневренности АЭС, особенно АЭС, расположенных в изолированных энергосистемах, в которых располагаются стратегически важные промышленные объекты [17]. Одним из способов повышения маневренности АЭС является использование систем накопления энергии.

Применение систем накопления энергии для АЭС обеспечит: снижение темпов износа оборудования АЭС, снижение стоимости и продолжительности ремонтных работ, повышение эффективности топливной кампании [17]. При этом снизится влияние других негативных факторов, о которых упоминалось выше, возникающих при работе энергоблоков в маневренных режимах.

Один из типов систем накопления энергии, которые могут применяться на АЭС, – аккумуляторы теплоты [19–21]. Наиболее перспективным направлением в сфере аккумулятирования тепловой энергии являются аккумуляторы теплоты с фазовым переходом, которые обладают высокой плотностью запаасаемой энергии и стабильностью температурных режимов в процессах заряда-разряда аккумулятора [22].

Целью данного исследования является оценка эффективности применения аккумуляторов теплоты в схемах АЭС с ВВЭР.

Объектом исследования является АЭС малой мощности с ВВЭР в изолированной энергосистеме.

Методы исследования. В ряде работ [19–21] рассмотрены способы применения аккумуляторов теплоты в схемах АЭС. Характерными чертами описываемых решений являются: использование части свежего пара или пара из регенеративных отборов турбоустановки для заряда аккумулятора; использование аккумулированной теплоты для частичного или полного замещения системы регенеративного подогрева питательной воды либо для генерации дополнительного пара.

С учетом описанных решений разработаны два варианта включения аккумуляторов теплоты в схему АЭС малой мощности с реактором ВВЭР, произведена оценка эффективности этих вариантов.

В качестве прототипов основного оборудования при разработке тепловой схемы стационарной АЭС малой мощности рассмотрены корабельные ЯЭУ КЛТ-40 и РИТМ 200. Данные корабельные ЯЭУ типа ВВЭР с высокой вероятностью могут послужить основой для создания стационарных АЭС малой мощности [23] для изолированных энергосистем.

Давление и температура свежего пара, тепловая мощность ЯЭУ и парогенератора (ПГ), а также температура питательной воды (ПВ) в

разработанной схеме приняты согласно характеристикам РИТМ-200.

В качестве прототипа схемы турбоустановки при разработке тепловой схемы стационарной АЭС малой мощности взята тепловая схема турбоустановки ТК-35/38-3,4, которая используется в блоке с реактором КЛТ-40С на плавучем энергоблоке «Академик Ломоносов» [24]. В данной турбоустановке применяется система травления пара минуя турбину [25] и быстродействующая редукционная установка (БРУ) для сброса пара в конденсатор, аналогичные устройства применяются и в турбоустановках стационарных АЭС [25]. Данные системы используются при резких колебаниях нагрузки. Сбросной пар через БРУ или систему травления обладает высокопотенциальной теплотой, которая может быть аккумулирована. Данный потенциал в разработанных нами решениях предлагается использовать для заряда аккумулятора теплоты.

Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР представлена на рис. 1.

Рассмотрены два варианта включения аккумуляторов теплоты с фазовым переходом в схему турбоустановки АЭС малой мощности: 1) для замещения ПВД1 (подогреватель высокого давления №1); 2) для выработки дополнительного пара низкого давления для ЦНД (цилиндр низкого давления). Принципиальные тепловые схемы турбоустановки с аккумуляторами теплоты представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

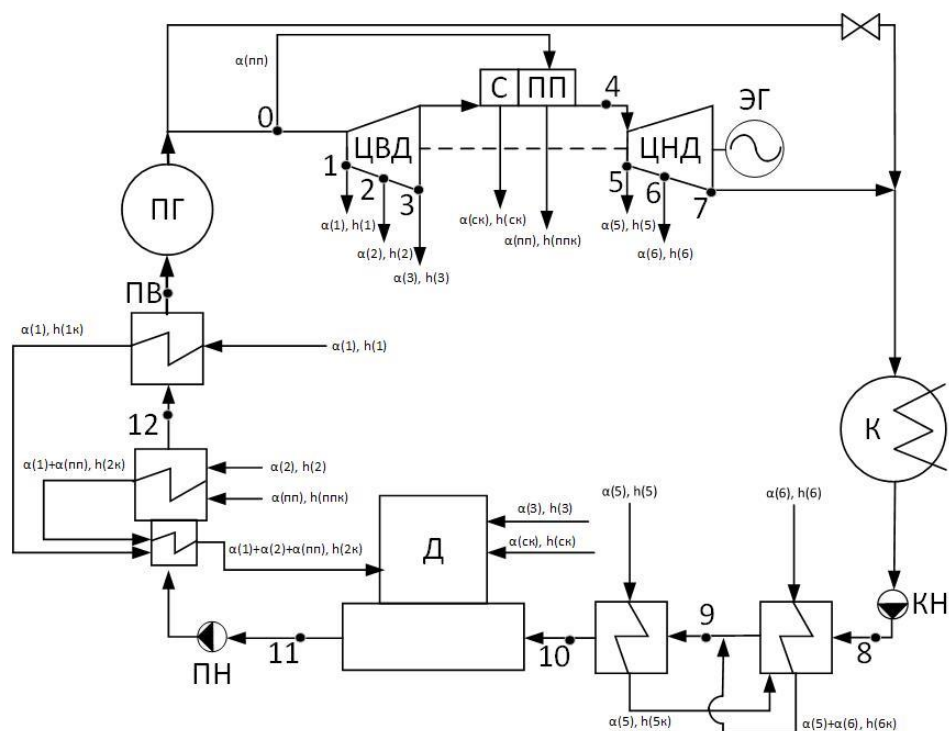
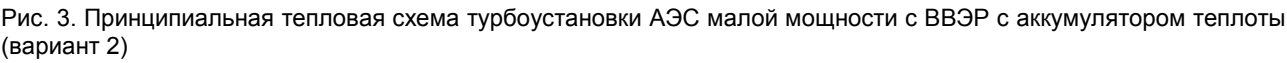
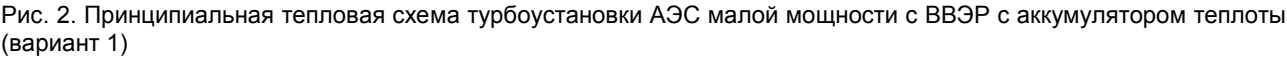


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема турбоустановки АЭС малой мощности с ВВЭР: ПГ – парогенератор; ЭГ – электрогенератор; Д – деаэратор; С – сепаратор; ПП – пароперегреватель; К – конденсатор; ПН – питательный насос; КН – конденсатный насос; h – энтальпия; α – доля расхода (от расхода пара из парогенератора); 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



Включение аккумулятора теплоты для замещения ПВД1 (вариант 1). Аккумулятор заряжается теплотой свежего пара, пускаемого в обход

турбины. Конденсат охлажденного в аккумуляторе пара возвращается в систему регенеративного подогрева турбоустановки или сбрасывается в конденсатор. Во время разряда аккумулятора снижается расход или полностью отключается регенеративный отбор №1 из ЦВД (цилиндр высокого давления) на ПВД1, за счет чего увеличивается генерируемая турбоустановкой мощность. Питательная вода после ЦВД2 частично или полностью поступает в аккумулятор теплоты, где нагревается до номинальной температуры питательной воды за счет аккумулированной теплоты.

Включение аккумулятора теплоты для генерации дополнительного пара низкого давления (вариант 2). Аккумулятор заряжается по схеме, аналогичной варианту 1. Во время разряда аккумулятора часть воды из линии основного конденсата после деаэратора (рис. 3, точка 11) подается в аккумулятор теплоты, где происходит ее нагрев до состояния насыщения и испарение, т.е. генерация влажного пара низкого давления за счет аккумулированной теплоты. Влажный пар низкого давления поступает в барабан-сепаратор аккумулятора теплоты, где разделяется на воду и насыщенный пар. Вода поступает обратно в аккумулятор теплоты. Сгенерированный

насыщенный пар низкого давления поступает в пароперегреватель турбоустановки, где смешивается с потоком пара, отработанного в ЦВД. Таки образом увеличивается количество пара, подаваемого в ЦНД, за счет чего увеличивается генерируемая турбоустановкой мощность.

Оценка эффективности применения аккумуляторов. Оценка эффективности применения аккумуляторов теплоты в схемах АЭС произведена на основании результатов расчета тепловых схем турбоустановок в стандартном исполнении (см. рис. 1) и схем в исполнениях с аккумуляторами теплоты в режимах разряда аккумуляторов (см. рис. 2 и рис. 3). Исходные данные для расчетов представлены в табл. 1.

При расчете схемы с аккумулятором теплоты по варианту 2 принимается доля расхода нагреваемого теплоносителя через аккумулятор $\alpha_g = 0,1$ от расхода питательной воды.

Результаты исследования. Результаты расчета тепловых схем турбоустановки АЭС в стандартном исполнении и в исполнении с аккумуляторами теплоты в режимах разряда представлены в табл. 2.

Таблица 1. Исходные данные для расчета тепловых схем турбоустановки АЭС в стандартном исполнении и с аккумуляторами теплоты

Параметр	Обозначение	Схема турбоустановки			Примечание
		без аккумуля- лятора теп- лоты	с аккумулятором теплоты		
			Вар. 1	Вар. 2	
Тепловая мощность реактора, МВт	$Q_{\text{реакт}}$	200			-
Давление свежего пара, МПа	P_0	3,5			-
Температура свежего пара, °C	T_0	285			-
Температура пара после паропере- гревателя, °C	$T_{\text{пп}}$	260			-
Степень сухости пара после по- следних ступеней ЦВД и ЦНД	x	0,93			-
КПД ЦВД и ЦНД	$\eta_{\text{о.е.}}$	0,85			-
Давления в камерах отборов, МПа	P_1	1,5	Отбор закрыт	1,5	ЦВД, отбор №1 на ПВД1
	P_2	0,7			ЦВД отбор №2 на ПВД2
	P_3	0,4			За ЦВД, на де- аэратор
	P_5	0,08			ЦНД, отбор №1 на ПНД3
	P_6	0,025			ЦНД, отбор №2 на ПНД4
Давление в конденсаторе, МПа	$P_{\text{конд}}$	0,007			-
Температура основного конден- сата/ питательной воды, °C	T_8	40			На входе в ПНД2
	T_9	60			После ПНД2
	T_{10}	80			После ПНД1
	T_{11}	105			После деаэра- тора
	T_{12}	140			После ПВД2
	$T_{\text{пв}}$	170			После ПВД1 (температура ПВ)

Таблица 2. Результаты расчета тепловых схем турбоустановки АЭС в стандартном исполнении и с аккумуляторами теплоты

Параметр		Обозначение	Тепловая схема		
			без аккумулятора	с аккумулятором, вариант 1	с аккумулятором, вариант 2
Мощность турбоагрегата, МВт		$N_{эл}$	64,9	69,6	69,2
КПД цикла, %		$\eta_{ту}$	32,5	34,8	34,6
Доля отбора, отн. ед.	На ПВД1	α_1	0,065	0,000	0,065
	На ПВД2	α_2	0,056	0,060	0,055
	На деаэратор	α_3	0,004	0,013	0,007
	На ПНД3	α_5	0,026	0,028	0,030
	На ПНД4	α_6	0,023	0,024	0,026
	На пароперегреватель	$\alpha_{пп}$	0,092	0,098	0,104
	Конденсата в сепараторе	$\alpha_{ск}$	0,055	0,058	0,054
Расход пара, кг/с	Начальный на турбоустановку (из парогенератора)	Gпг-0	89,6	89,6	89,6
	ЦВД 0-1	G0-1	81,3	80,8	80,3
	ЦВД 1-2	G1-2	75,5	80,8	74,5
	ЦВД 2-3	G2-3	70,5	75,5	69,6
	3-С	G3-с	70,1	74,3	68,9
	С-ПП	Gс-пп	65,2	69,0	64,1
	ПП-ЦНД 4-5	G4-5	65,2	69,0	73,1
	ЦНД 5-6	G5-6	62,8	66,6	70,5
	ЦНД 6-7	G6-7	60,8	64,4	68,1

Критериями эффективности применения схем с аккумуляторами теплоты служит значение дополнительной выработки электроэнергии за счет аккумулированной теплоты сбросного пара и КПД цикла турбоустановки в режиме разряда аккумуляторов. Расчетные формулы и результаты расчета эффективности схем с аккумуляторами теплоты представлены в табл. 3.

Обсуждение результатов. При включении аккумуляторов теплоты по двум рассмотренным схемам наблюдается увеличение мощ-

ности турбоустановки в режиме разряда аккумуляторов. В обоих вариантах наблюдается увеличение расхода свежего пара на пароперегреватель и, соответственно, снижение начального расхода пара на турбину. Однако снижение начального расхода пара на турбину компенсируется увеличением расхода пара через промежуточные и конечные ступени ЦВД и ЦНД, что в конечном итоге приводит к увеличению мощности турбоустановки.

Таблица 3. Результаты расчета эффективности применения аккумуляторов теплоты в схеме АЭС с ВВЭР

Параметр	Обозначение	Расчетная формула	Способ включения аккумулятора	
			вариант 1	вариант 2
Характеристика нагреваемого теплоносителя	–	–	питательная вода	вода-насыщенный пар
Отношение количества нагреваемого в аккумуляторе теплоносителя к количеству сбросного пара, отн. ед.	z	$\frac{h_0 - h_{0к}}{h'_{нагр} - h''_{нагр}}$	15,37	0,84
Прирост электрической мощности в расчетном режиме, МВт	$\Delta N_{эл}$	$N_{эли} - N_{эл0}$	4,6	4,2
Прирост мощности на единицу нагреваемого в аккумуляторе теплоносителя в расчетном режиме, МВт/(кг/с)	f	$\frac{\Delta N_{эл}}{G_{нагр}}$	0,04	0,47
Дополнительная выработка электроэнергии за счет аккумулированной теплоты сбросного пара, МДж/кг	v	$f \cdot z$	0,63	0,40

Дополнительная выработка электроэнергии за счет аккумулированной теплоты при включении по варианту 1 составила 0,63 МДж на каждый килограмм сбросного пара, мощность турбоустановки была увеличена на 7,2 %. При включении по варианту 2 дополнительная выработка электроэнергии за счет аккумулированной теплоты составила 0,40 МДж на каждый килограмм сбросного пара, мощность турбоустановки была увеличена на 6,6 %. Таким образом, первый вариант является более эффективным с точки зрения использования аккумулированной теплоты сбросного пара. Такая разница обусловлена изменением расходов пара через ЦНД и ЦВД в режимах разряда аккумуляторов, по сравнению со стандартной схемой без аккумулятора.

Действительно, при включении аккумулятора по варианту 2 в режиме разряда аккумулятора наблюдается увеличение расхода пара только через ЦНД. При включении аккумулятора по варианту 1 в режиме разряда аккумулятора наблюдается увеличение расхода пара в ЦНД и ЦВД (за исключением участка 0-1 до отбора на ПВД1), что объясняет более высокую эффективность варианта 1.

Стоит отметить простоту исполнения варианта 1, по сравнению с вариантом 2. При исполнении варианта 1 исключается необходимость в дополнительном повышающем насосе для питания аккумулятора теплоты нагреваемым теплоносителем; аккумулятор теплоты для варианта 1 будет иметь более простую конструкцию (будет отсутствовать испарительная часть и сепаратор).

Выводы. Использование аккумуляторов теплоты в схемах АЭС малой мощности с ВВЭР позволит вырабатывать дополнительную электроэнергию за счет аккумулированной теплоты сбросного пара. Таким образом, данные решения являются одним из способов повышения маневренности АЭС. При резких сбросах нагрузки избыточная теплота в виде свежего пара будет аккумулироваться в аккумуляторах теплоты с фазовым переходом. Потенциал выработки дополнительной электроэнергии за счет аккумулированной теплоты возможно использовать при резких увеличениях потребляемой в сети нагрузки.

Наиболее привлекательным из двух рассмотренных вариантов применения аккумуляторов теплоты в схеме АЭС малой мощности с ВВЭР: 1) для замещения ПВД1; 2) для генерации дополнительного пара низкого давления для подачи в ЦНД, является схема с замещением ПВД1, которая конструктивно более простая и позволяет более эффективно вырабатывать электроэнергию за счет аккумулированной теплоты.

Список литературы

1. **Реакторы** малой мощности для удаленных районов севера: билибинская АТЭЦ и другие проекты /

Ю.Д. Баранаев, В.В. Долгов, Л.А. Николенко и др. // Атомная энергия. – 1997. – Т. 83, № 6. – С. 420–426.

2. **Колкова 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. **Scenario Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic / Y. Zhukovskiy, P. Tsvetkov, A. Buldysko, et al.** // Resources. – 2021. – Vol. 10, No. 12.

4. **Назарова З.М., Желнин Е.П.** Состояние и перспективы развития минерально-сырьевой базы и добычи урана в Российской Федерации // Записки Горного института. – 2008. – Т. 179. – С. 36–41.

5. **Влияние маневренных режимов реакторов ВВЭР-1000 на оболочки ТВЭЛ и на КИУМ / В. Киров, Я. Комарова, В. Душок, А. Латий** // Sciences of Europe. – 2019. – № 45-1(45). – С. 25–32.

6. **Сукрушев А.В., Браславский Ю.В., Аникевич К.П.** О возможности переработки боросодержащих вод при сниженном давлении с использованием центробежных нагнетателей // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4, № 1. – С. 36–40.

7. **Дьяков А.А., Перехожева Т.Н., Иванов В.Ю.** Применение пластиковых трековых детекторов для определения делящихся материалов в жидких радиоактивных отходах АЭС // Записки Горного института. – 2005. – Т. 166. – С. 175–178.

8. **Тодорцев Ю.К., Фощ Т.В., Никольский М.В.** Анализ методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором при маневрировании // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 6, № 8(66). – С. 3–10.

9. **Семченков Ю.** Использование топлива в реакторах ВВЭР: состояние и перспективы // Росэнергоатом. – 2014. – № 11. – С. 8.

10. **Lavrik A., Zhukovskiy Y., Tsvetkov P.** Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting // Energies. – 2021. – Т. 14, № 16. – С. 5059.

11. **Кругликов П.А., Лебедев В.А., Рудченко С.А.** Перспективы использования систем аккумулирования тепла на атомных электрических станциях // Энергоэффективность энергетического оборудования: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 8–9 октября 2014 г. – 2014. – Т. 1. – С. 204.

12. **Ростунцова И.А., Шевченко Н.Ю.** Оценка эффективности энергоблоков АЭС при покрытии переменной части графика электрических нагрузок // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9-3. – С. 474–479.

13. **Yurin V.E., Egorov A.N.** Primary frequency regulation in the power system by nuclear power plants based on hydrogen-thermal storage // International Journal of Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47, № 8. – С. 5010–5018.

14. **Ulanov, V.L., Ulanova, E.Yu.** Impact of External Factors on National Energy Security // Journal of Mining Institute. – 2019. – Vol. 238. – P. 474.

15. **Shklyarskiy Y.E., Batueva D.E.** Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex // Journal of Mining Institute. – 2022. – Vol. 253. – P. 115–126.

16. **Алексеев С.В., Зайцев В.А., Толстоухов С.С.** Дисперсионное ядерное топливо. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2015. – 248 с.

17. Aleksandrova T.N., Talovina I.V., Duryagina A.M. Gold-sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation // *Geochemistry*. – 2020. – Т. 80, No. 3. – С. 125510.

18. **Задачи** атомных станций малой мощности в энергообеспечении / П.Н. Алексеев, Ю.Н. Удянский, С.А. Субботин, Т.Д. Щепетина // *Атомная энергия*. – 2007. – Т. 102, № 4. – С. 203–208.

19. **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.

20. **Косицын А.А.** Повышение маневренных характеристик АЭС применением аккумуляирования теплоты // *Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодежи: материалы IV Российской молодежной научной школы-конференции*, г. Томск, 01–03 ноября 2016 года. – Томск, 2016. – С. 351–356.

21. **Абросимова Н.И., Каверзнев М.М.** К вопросу о конкурентоспособности системы аккумуляирования тепловой энергии как способа организации маневренного режима АЭС // *Вестник Московского энергетического института*. – 2016. – № 5. – С. 57–62.

22. **Kenisarin M.M.** High-temperature phase change materials for thermal energy storage // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2010. – Т. 14, № 3. – С. 955–970.

23. **Обликовый** проект АСММ с реакторной установкой РИТМ-200 / В.В. Петрунин, Ю.П. Фадеев, А.Н. Пахомов и др. // *Атомная энергия*. – 2018. – Т. 125, № 6. – С. 323–327.

24. **Букаринов А.Э.** Проект АСММ на базе РУ РИТМ-200 // *Бутаковские чтения: материалы I Всерос. с междунар. участием молодежной конф.*, г. Томск, 15–16 декабря 2021 г. – Томск, 2021. – С. 185–189.

25. **Турбоагрегаты** для атомных ледоколов и подводных лодок [Электронный ресурс] // Информационное агентство «ПРОАтом». Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2794> (дата обращения: 19.03.2023).

26. **Опыт** создания и освоения новых электрогидравлических систем регулирования турбин ЛМЗ для атомных электростанций / И.З. Черномзав, А.Д. Меламед, А.А. Морозова и др. // *Теплоэнергетика*. – 2013. – № 10. – С. 56.

References

1. Baranaev, Yu.D., Dolgov, V.V., Nikolenko, L.A., Orekhov, Yu.I., Sergeev, Yu.A., Sharapov, V.N. Reactory maloy moshchnosti dlya udalennykh rayonov severa: bilibinskaya ATETs i drugie proekty [Low-power reactors for remote areas of the North: Bilibinskaya ATEC and other projects]. *Atomnaya energiya*, 1997, vol. 83, no. 6, pp. 420–426.

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

3. Zhukovskiy, Y., Tsvetkov, P., Buldysko, A., Stoyanova, A., Malkova, Y., Koshenkova, A. Scenario

Modeling of Sustainable Development of Energy Supply in the Arctic. *Resources*, 2021, vol. 10, no. 12.

4. Nazarova, Z.M., Zhelnin, E.P. Sostoyanie i perspektivy razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy i dobychi urana v Rossiyskoy Federatsii [State and prospects of development mineral resource base and uranium mining in the russian federation]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2008, vol. 179, pp. 36–41.

5. Kirov, V., Komarova, Ya., Dushok, V., Latiy, A. Vliyanie manevrennykh rezhimov reaktorov VVER-1000 na obolochki TVEL i na KIUM [Influence of the maneuvered modes of vver-1000 reactors on the shells of the fuel element and on the cuff]. *Sciences of Europe*, 2019, no. 45-1(45), pp. 25–32.

6. Sukrushev, A.V., Braslavskiy, Yu.V., Anikevich, K.P. O vozmozhnosti pererabotki boro-soderzhashchikh vod pri snizhennoy davlenii s ispol'zovaniem tsentrobezhnykh nagnatateley [About the possibility of the borated water treatment under reduced pressure with the help of centrifugal blowers]. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 36–40.

7. Dyakov, A.A., Perekhovcheva, T.N., Ivanov, V.Yu. Primenenie plastikovykh trekovykh detektorov dlya opredeleniya delyashchikhsya materialov v zhidkikh radioaktivnykh otkhodakh AES [The use of plastic track detectors for the determination of fissile materials in liquid radioactive waste of nuclear power plants]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2005, vol. 166, pp. 175–178.

8. Todortsev, Yu. K., Foshch, T.V., Nikol'skiy, M.V. Analiz metodov upravleniya moshchnost'yu energobloka c vodovodyanym reaktorom pri manevrirovanii [Analysis of power control methods for a power unit with a pressurized water reactor during maneuvering]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2013, vol. 6, no. 8 (66), pp. 3–10.

9. Semchenkov, Yu. Ispol'zovanie topliva v reaktorakh VVER: sostoyanie i perspektivy [Use of fuel in reactors VVER: the state of VVER: the state and prospects]. *Rosenergoatom*, 2014, no. 11, p. 8.

10. Lavrik, A., Zhukovskiy, Y., Tsvetkov, P. Optimizing the size of autonomous hybrid microgrids with regard to load shifting. *Energies*, 2021, vol. 14, no. 16, p. 5059.

11. Kruglikov, P.A., Lebedev, V.A., Rudchenko, S.A. Perspektivy ispol'zovaniya sistem akkumulirovaniya tepla na atomnykh elektricheskikh stantsiyakh [Prospects for the use of heat storage systems at nuclear power plants]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energoeffektivnost' energeticheskogo oborudovaniya»*, g. Sankt-Peterburg, 8–9 oktyabrya 2014 g. [Proceedings of research papers of international scientific conference, St Petersburg, 8–9 October, 2014], 2014, vol. 1, p. 204.

12. Rostuntsova, I.A., Shevchenko, N.Yu. Otsenka effektivnosti energoblokov AES pri pokrytii peremennoy chasti grafika elektricheskikh nagruzok [Evaluation of the efficiency of power units of nuclear power plants in the coating of the variable part of the schedule of electrical loads]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2015, no. 9-3, pp. 474–479.

13. Yurin, V.E., Egorov, A.N. Primary frequency regulation in the power system by nuclear power plants based on hydrogen-thermal storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, vol. 47, no. 8, pp. 5010–5018.

14. Ulanov, V.L., Ulanova, E.Yu. Impact of External Factors on National Energy Security. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 238, p. 474.
15. Shklyarskiy, Y.E., Batueva, D.E. Operation mode selection algorithm development of a wind-diesel power plant supply complex. *Journal of Mining Institute*, 2022, vol. 253, pp. 115–126.
16. Alekseev, S.V. Zaytsev, V.A. Tolstoukhov, S.S. *Dispersionnoe yadernoe toplivo* [Dispersive nuclear fuel]. Moscow: TEKhNOSFERA, 2015. 248 p.
17. Aleksandrova, T.N., Talovina, I.V., Duryagina, A.M. Gold–sulphide deposits of the Russian Arctic zone: Mineralogical features and prospects of ore beneficiation. *Geochemistry*, 2020, vol. 80, no. 3, pp. 125510.
18. Alekseev, P.N., Udyanskiy, Yu.N., Subbotin, S.A., Shchepetina, T.D. Zadachi atomnykh stantsiy maloy moshchnosti v energoobespechenii [Tasks of low-power nuclear power plants in energy supply]. *Atomnaya energiya*, 2007, vol. 102, no. 4, pp. 203–208.
19. Bazhanov, V.V., Loshchakov, I.I., Shchuklinov, A.P. Issledovanie vozmozhnosti ispol'zovaniya na AES akkumulyatorov teplovoy energii pri regulirovani chasty toka v seti [Investigation of the possibility of using thermal energy accumulators at nuclear power plants when regulating the frequency of current in the network]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2013, no. 4, pp. 29–36.
20. Kositsyn, A.A. Povyshenie manevrennykh kharakteristik AES primeneniem akkumulirovaniya teploty [Improving the maneuverability characteristics of nuclear power plants by using heat storage]. *Materialy IV Rossiyskoy molodezhnoy nauchnoy shkoly-konferentsii «Energetika, elektromekhanika i energoeffektivnye tekhnologii glazami molodezhi»*, g. Tomsk, 01–03 noyabrya 2016 goda [Proceedings of IV Russian scientific conference for young researchers «Energy, electromechanics and energy-efficient technologies through the eyes of young people. Tomsk, 1–3 November 2016]. Tomsk, 2016, pp. 351–356.
21. Abrosimova, N.I., Kaverznev, M.M. K voprosu o konkurentosposobnosti sistemy akkumulirovaniya teplovoy energii kak sposoba organizatsii manevrennogo rezhima AES [On the issue of the competitiveness of the thermal energy storage system as a way of organizing the maneuverable regime of nuclear power plants]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2016, no. 5, pp. 57–62.
22. Kenisarin, M.M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2010, vol. 14, no. 3, pp. 955–970.
23. Petrunin, V.V., Fadeev, Yu.P., Pakhomov, A.N., Veshnyakov, K.B., Polunichev, V.I., Shamanin, I.E. Oblivovyy projekt ASMM s reaktornoy ustanovkoy RITM-200 [The AFM oblique project with the RITM-200 reactor plant]. *Atomnaya energiya*, 2018, vol. 125, no. 6, pp. 323–327.
24. Bukarinov, A.E. Proekt ASMM na baze RU RITM-200 [The project of a low-power NPP based on ritm-200]. *Materialy I Vserossiyskoy s mezhdunarodnym uchastiem molodezhnoy konferentsii. Butakovskie chteniya, Tomsk, 15–16 dekabrya 2021 g.* [Proceedings of I All Russian conference with international participants for young researchers. Butakovsky readings, Tomsk, 15–16 December 2021]. Tomsk, 2021, pp. 185–189.
25. *Turboagregaty dlya atomnykh ledokolov i podvodnykh lodok* [Turbine units for nuclear icebreakers and submarines]. Informatsionnoe agentstvo «PRoAtom». Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=2794> (data obrashcheniya: 19.03.2023).
26. Chernomzav, I.Z., Melamed, A.D., Morozova, A.A., Nefedov, K.A., Rumyantseva, T.N., Pomelov, S.Yu. Opyt sozdaniya i osvoeniya novykh elektrogidravliche-skikh sistem regulirovaniya turbin LMZ dlya atomnykh elektrostantsiy [Experience in the creation and development of new electrohydraulic control systems for LMZ turbines for nuclear power plants]. *Teploenergetika*, 2013, no. 10, pp. 56–56.