

УДК 620.9+519.2

EDN: IDLUUU

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

С.С. Теплякова

ORCID: 0009-0003-2691-0934 e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Россия

В.А. Горбунов

ORCID: 0000-0002-8629-4219 e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Россия

Н.А. Лоншаков

ORCID: 0000-0001-5353-9964 e-mail: nik-lon@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Россия

М.Н. Мечтаева

ORCID: 0009-0008-8245-1564 e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Россия

П.А. Минеев

ORCID: 0009-0004-8023-716X e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
Иваново, Россия

Проведена оценка влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблока АЭС. Методология исследования основана на принципе предельного энергосбережения. Регенеративный подогрев питательной воды является мощным фактором повышения тепловой экономичности АЭС. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. Рассмотрены задачи по определению предельных характеристик, показывающие эффективность эксплуатации энергоблока, и проведено их сравнение с реальными значениями энергоблока № 3 с реактором ВВЭР-1000 Калининской АЭС. Рассмотрены варианты с различной мощностью работы блока с условной электрической мощностью от 750 до 1070 МВт. Предложены для анализа две целевые функции по оценке эффективности энергосбережения в регенеративных системах регенеративного подогрева воды. Предложенные целевые функции позволят составить технико-экономические рекомендации к повышению эффективности эксплуатации энергетического оборудования и систем и полезно использовать подведенную энергию при производстве электрической и тепловой мощностей.

Ключевые слова: АЭС, энергосбережение, вторичные энергетические ресурсы, регенерация, КИУМ, коэффициент предельной регенерации, коэффициент использования энергии.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Теплякова, С.С. Анализ влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблоков АЭС / С.С. Теплякова, В.А. Горбунов, Н.А. Лоншаков, М.Н. Мечтаева, П.А. Минеев // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. 2024. № 3. С. 48-61. EDN: IDLUUU

ANALYSIS OF IMPACT OF SECONDARY ENERGY RESOURCES ON NPP POWER UNITS EFFICIENCY

S.S. Teplyakova

ORCID: 0009-0003-2691-0934 e-mail: svetlana20212120@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

V.A. Gorbynov

ORCID: 0000-0002-8629-4219 e-mail: gorbynov.w@mai.ru

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

N.A. Lonshakov

ORCID: 0000-0001-5353-9964 e-mail: nik-lon@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

M.N. Mechtaeva

ORCID: 0009-0008-8245-1564 e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

P.A. Mineev

ORCID: 0009-0004-8023-716X e-mail: pasha.mineevr@yandex.ru

Ivanovo State Power Engineering University

Ivanovo, Russia

Abstract. This article presents an assessment of the impact of secondary energy resources on the efficiency of a nuclear power plant (NPP) power unit operation. The principle of maximum energy saving was applied in the study. Regenerative heating of feedwater is a powerful factor in increasing the NPP thermal efficiency. Regeneration was chosen as the direction for using secondary energy resources of the second circuit. The limiting characteristics showing the efficiency of the power unit operation were determined and compared with the real values of power unit No. 3 with a WWER-1000 reactor of the Kalinin NPP. Options with different operating capacities of the unit with a nominal electrical power from 750 to 1070 MW were considered. Two objective functions for evaluating the efficiency of energy saving in regenerative systems of regenerative water heating are proposed for analysis. The proposed objective functions will allow to draw up technical and economic recommendations for improving the efficiency of operation of power equipment and systems, thus effectively using the supplied energy in the production of electrical and thermal power.

Key words: nuclear power plant, energy saving, secondary energy resources, regeneration, capacity factor, marginal regeneration factor, energy utilization factor.

FOR CITATION: S.S. Teplyakova, V.A. Gorbynov, N.A. Lonshakov, M.N. Mechtaeva, P.A. Mineev. Analysis of impact of secondary energy resources on NPP power units efficiency. Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2024. № 3. Pp. 48-61. EDN: IDLUUU

Введение

В настоящее время для отечественной энергетики актуальным является получение необходимой выработки тепловой и электрической энергии [1] на основе принципа эффективного и рационального использования энергетических ресурсов. Возникает необходимость оценки и поиск путей энергосбережения. При использования атомной энергии действует принцип обеспечения безопасности [2, 3]. Наиболее распространенная характеристика эффективности работы АЭС – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), рав-

ный отношению фактической энерговыработки реакторной установки за определенный период к теоретической энерговыработке при работе без остановок при номинальной мощности. КИУМ не отражает эффективность использования энергии на АЭС, в то время как величина цехового передела для получения ядерного топлива достаточно высока и со временем продолжает увеличиваться. Объясняется это большими затратами на проектирование, возведение, эксплуатацию станции и вывод из эксплуатации после выработки ресурса. Тенденция развития атомной энергетики и постепенное замещение ею углеводородной энергетики ставит задачу переноса и применения лучших практик углеводородной энергетики в атомной.

В углеводородной энергетике большое внимание уделяется энергоэффективности и использованию вторичных энергетических ресурсов (ВЭР). Оценка и анализ использования энергетических отходов внутреннего использования при утилизации ВЭР является непростой задачей, в которой необходимо учесть особенности работы для второго контура каждого элемента тепломеханического оборудования. Под энергетическими отходами понимается часть энергии, которая прямо или косвенно не используется как полезная для выпуска готовой продукции или услуг. Под вторичными энергоресурсами (ВЭР) понимается энергетический потенциал отходов продукции, побочных и промежуточных отходов, образующихся в технологических установках (системах), который не используется в самой установке, но может быть частично или полностью использован для энергоснабжения других установок.

Для первичного преобразования ядерной энергии в тепловую на АЭС широко используются водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР). Второй контур состоит из тепломеханического оборудования (рис. 1).

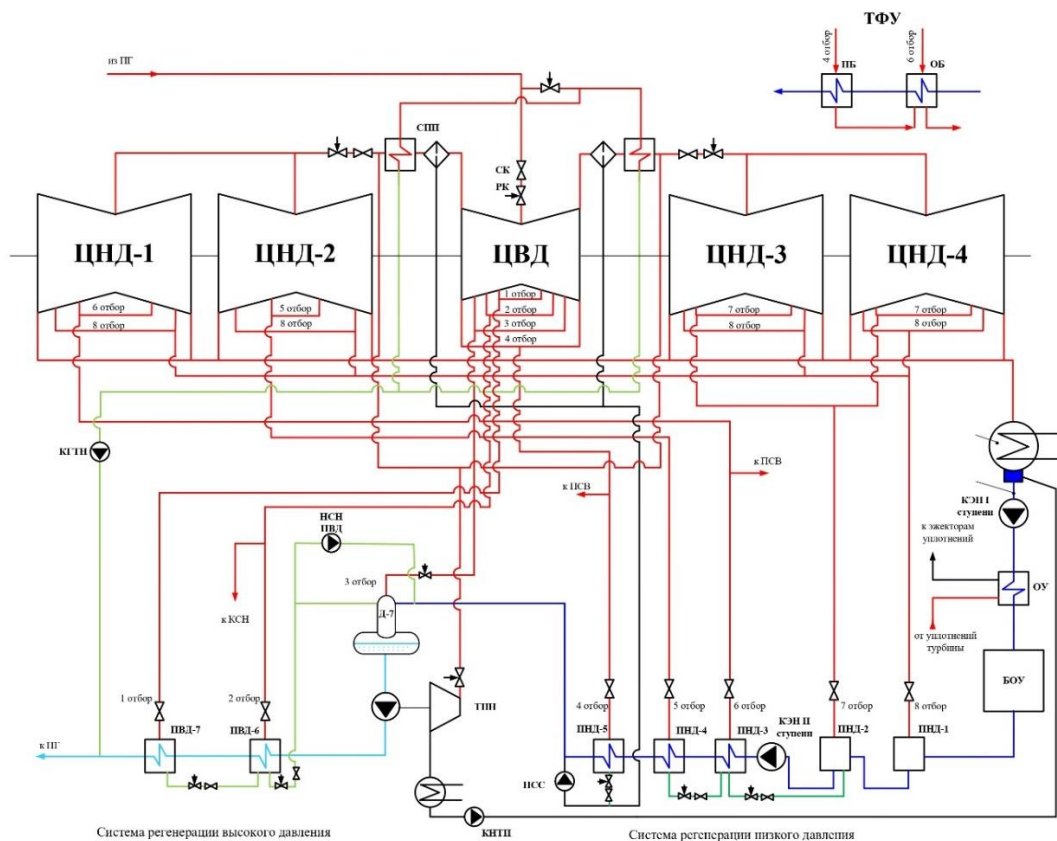


Рис. 1. Расчетная тепловая схема второго контура АЭС с реактором ВВЭР

Fig. 1. Calculated thermal scheme of the second circuit of a NPP with a water-water energetic reactors (WVER) reactor

Объектом исследования является система регенеративного подогрева воды, включающая в себя комплекс систем [4-6]:

- 1) система регенерации высокого давления;
- 2) система регенерации низкого давления;
- 3) деаэрационная установка;
- 4) система сепарации и промежуточного перегрева пара.

Система регенеративного подогрева воды паротурбинных установок тепловых и атомных электрических станций представляют собой сложную систему взаимосвязанного между собой оборудования, объединяющую в себе особенности эксплуатации, как подогреватели низкого давления, деаэратор, подогреватели высокого давления, так и перекачивающие конденсатные и питательные насосы.

Целью данной работы является исследование оценки влияния вторичных энергетических ресурсов на эффективность эксплуатации энергоблока АЭС. В статье рассматриваются вторичные энергоресурсы, которые возвращаются обратно в технологическую установку за счет регенерации, и в результате этого сокращают количество подведенной энергии при неизменной величине поступления энергии в технологическую установку.

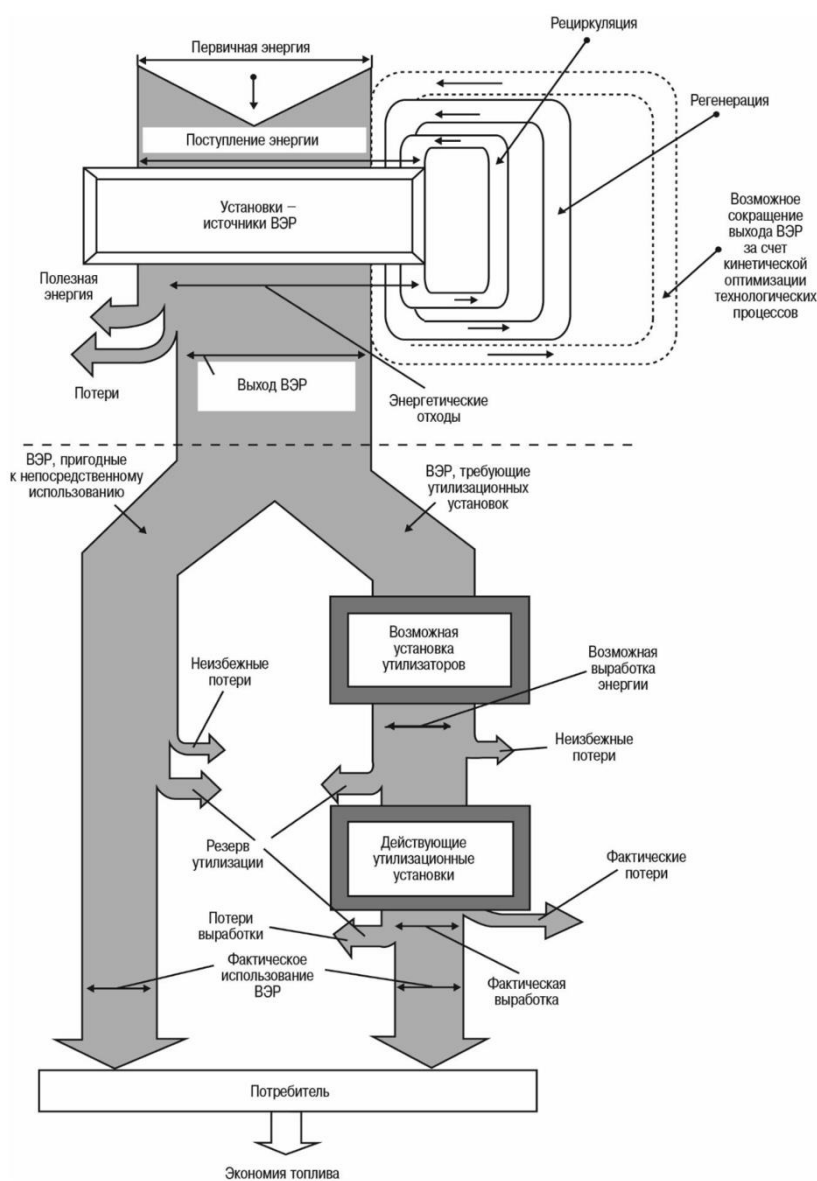


Рис. 2. Принципиальная схема использования энергоресурсов при утилизации ВЭР

Fig. 2. Schematic diagram of energy resource use during utilization of secondary energy resources

Все экспериментальные значения параметров были получены в ходе промышленного эксперимента на энергоблоке № 3 Калининской АЭС.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- анализ направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура для повышения эффективности эксплуатации энергоблока АЭС;
- оценка эффективности внутреннего использования ВЭР, используя принцип предельного энергосбережения.

Материалы и методы исследования

В качестве метода исследования был использован принцип предельного энергосбережения [7,8]. С учетом этого проведен поиск характеристики термодинамически идеальных технологических установок, наделенных некоторыми свойствами, теоретически обеспечивающими минимальный расход топлива (теплоты) на проведение теплотехнологического процесса. Приведенная на рис. 2 схема показывает основные направления исследования для выбора направления использования ВЭР. Необходимо обратить внимание на внутреннее использование ВЭР, которое имеет преимущества по сравнению с внешним. *Во-первых*, вторичные энергетические ресурсы используются в самой установке, что позволяет не думать о совмещении графиков работы технологической установки (источника ВЭР) и энергетической потребителя ВЭР. *Во-вторых*, затраты на реализацию мероприятий по внутреннему использованию ВЭР на порядок меньше, чем при внешнем использовании. Однако с точки зрения эффективности передачи энергии, внешнее использование ВЭР установки эффективнее внутреннего.

Все направления по утилизации ВЭР (рис. 2) можно распределить по затратам на их реализацию в следующей последовательности: рециркуляция; регенерация; непосредственное использование ВЭР; использование ВЭР через утилизационные установки. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. Регенеративный подогрев питательной воды является мощным фактором повышения тепловой экономичности АЭС и осуществляется на АЭС всех типов. Он осуществляется отработавшим в турбине паром, который конденсируется затем в подогревателях. Выделенная этим паром теплота фазового перехода возвращается в реактор. Регенеративный подогрев конденсата снижает потерю теплоты с отработавшим паром и повышает эффективность использования энергии топлива. На электрических станциях с паротурбинными установками используется цикл Ренкина, термодинамический КПД которого ниже такового у цикла Карно. Внедрение регенеративного подогрева в цикл Ренкина заметно приближает его к предельно возможному значению – к КПД цикла Карно. В двухконтурных ядерных энергетических установках (ЯЭУ) АЭС с теплоносителем «вода под давлением» с использованием регенеративного теплообмена цикл Ренкина на сухом насыщенном паре имеет широкое распространение. В диаграмме T-S такой цикл имеет вид 1-2-3-4-1 (рис. 3).

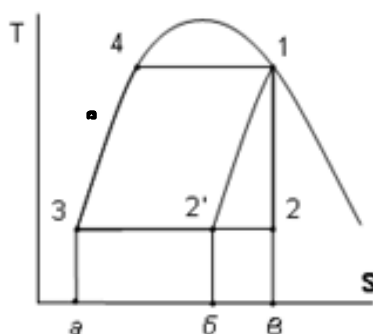


Рис. 3. Цикл Ренкина и предельный регенеративный цикл на насыщенном паре

Fig. 3. Rankine cycle and limiting regenerative cycle on saturated steam

На рис. 3 показан цикл Ренкина на насыщенном паре. Он ограничен замкнутой линией 1-2-3-4. Если расширение пара ниже точки 1 сочетать с отводом теплоты к питательной воде, процесс пойдет по линии 1-2', равноудаленной от линии 3-4. При обратном теплообмене температура питательной воды $T_{п.в}$ в точке 4 будет равна температуре насыщения в точке 1, выше, чем в цикле Ренкина (точка 3), поэтому возрастает средний температурный уровень подвода тепла, следовательно, увеличится КПД. Цикл 1-2'-3-4 называют предельным регенеративным циклом [4,9,10]. Это цикл с максимально возможной тепловой экономичностью. Значения термического КПД предельного регенеративного цикла и КПД цикла Карно при одинаковых значениях начальной и конечной температуре циклов близки. Теплота, подведенная в реакторе к 1 кг в предельном регенеративном цикле [11, 12],

$$q_{п.э.} = i_1 - i_4, \quad (1)$$

где i_1 – энтальпия пара после парогенератора, кДж/кг; i_4 – энтальпия воды перед парогенератором, кДж/кг.

Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе),

$$q_k = (s_2' - s_3) \cdot T_2. \quad (2)$$

Так как $s_2' - s_3 = s_1 - s_4$, то

$$q_k = (s_1 - s_4) \cdot T_2, \quad (3)$$

где s_1 – энтропия пара на входе в конденсатор, кДж/(кг*К); s_4 – энтропия воды на входе в парогенератор, кДж/(кг*К); T_2 – температура конденсата К.

С помощью выражений (1-2) можно выразить КПД предельного регенеративного цикла:

$$\eta_{пр} = 1 - \frac{q_k}{q_{п.э.}} = 1 - T_2 \frac{(s_1 - s_4)}{(i_1 - i_4)} \quad (4)$$

Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности представлены табл. 1. Для примера во всех расчетах приведены значения параметров и условных мощностей, которые были получены в режиме эксплуатации энергоблока № 3 Калининской АЭС.

Таблица 1.

Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности

Table 1.

Efficiency values of the limiting regenerative cycle with an infinite number of regenerative extractions depending on the nominal power

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Давление воды перед парогенератором	МПа	6,6	6,8	6,8	6,8	7,0
Давление воды после конденсатора	кПа	5,23	5,23	5,23	5,23	5,10
Энтропия воды перед парогенератором в точке 4	кДж/(кг·К)	5,844	5,829	5,829	5,829	5,815
Энтропия в точке 1	кДж/(кг·К)	8,378	8,378	8,378	8,378	8,387
Изменение энтропии воды от конденсатора до парогенератора	кДж/(кг·К)	2,534	2,549	2,549	2,549	2,572
Температура отвода тепла,	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе)	кДж/кг	779,6	781,3	781,3	781,3	791,2
Температура подвода пара после парогенератора	К	552	552	552	552	553
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2781	2781	2781	2781	2780
Давление пара после парогенератора	МПа	6,30	6,30	6,30	6,30	6,40
Энтальпия конденсата перед парогенератором	кДж/кг	1230	1230	1230	1230	1236

Окончание табл. 1.

Значения КПД предельного регенеративного цикла при бесконечном количестве регенеративных отборов в зависимости от условной мощности

Table 1 (continued).

Efficiency values of the limiting regenerative cycle with an infinite number of regenerative extractions depending on the nominal power

Теплота, подведенная в горячем источнике (парогенераторе)	кДж/кг	1551	1551	1551	1551	1544
КПД предельного регенеративного цикла	–	0,497	0,496	0,496	0,496	0,488

Из термодинамики следует, что если между двумя источниками тепла с температурами T_1 и T_2 организовать рабочий цикл (рис. 4), то его экономичность, измеряемая термическим КПД η_t существенно зависит от вида цикла. Предельно возможное (т.е. максимальное) значение КПД η_t имеет цикл Карно, состоящий из двух изотерм подвода и отвода тепла (T_1 и T_2) и двух адиабат – расширения s_1 и сжатия s_4 рабочего тела между этими изотермами.

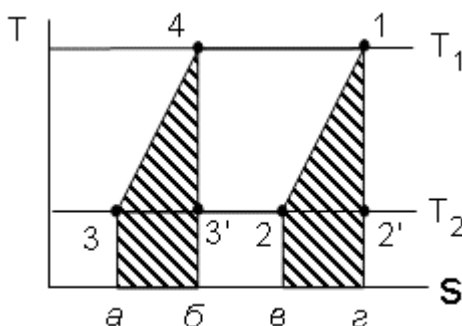


Рис. 4. Цикл Карно и обобщенный цикл Карно в диаграмме T – S

Fig. 4. Carnot cycle and generalized Carnot cycle in TS diagram

КПД такого цикла составляет

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

Термический КПД у любых других циклов между этими же источниками тепла будет ниже, в том числе и у цикла Ренкина. Но существует цикл, равноценный по экономичности циклу Карно – обобщенный цикл Карно. Цикл 1-2'-3'-4'-1 – цикл Карно, а цикл 1-2-3-4-1 – обобщенный цикл Карно. КПД такого цикла в зависимости от условной мощности приведен в табл. 2. При бесконечно большом числе ступеней подогрева термический КПД цикла определяется однозначно, но если число ступеней конечно, то КПД цикла будет различным в зависимости от того, как распределены температуры подогрева между отдельными ступенями. Поскольку использование свежего пара в системе регенеративного подогрева неэффективно, последняя ступень подогрева питательной воды осуществляется непосредственно в парогенераторе.

Температура конденсата после последнего регенеративного подогревателя будет несколько ниже температуры насыщения в точке 1 и равна температуре в точке 4' (рис. 3) и поэтому КПД регенеративного цикла будет выше (табл. 3).

Если принять, что система регенерации должна иметь одинаковые по мощности отборы, то можно определить зависимость величины перепада температур на каждом отборе от их количества:

$$\Delta t = \frac{(T_1 - T_2)}{z + 1}, \quad (6)$$

где z – количество отборов.

Таблица 2.
Значения предельно возможного значения КПД обобщенного цикла Карно
в зависимости от условной мощности блока

Table 2.
Values of the maximum possible efficiency of the generalized Carnot cycle
depending on the nominal power of the unit

Условная мощность	Температура подвода тепла	Температура отвода тепла	Предельно возможное значение КПД обобщенного цикла Карно
МВт	К	К	-
750	545,9	307,6	0,437
1020	547,7	306,5	0,440
1030	547,7	306,5	0,440
1037	547,7	306,5	0,440
1070	547,0	307,6	0,438

Температура питательной воды на входе в парогенератор равна температуре питательной воды на выходе из подогревателя высокого давления перед парогенератором. Это значение температуры питательной воды, при котором КПД максимальный, называется термодинамически оптимальной температурой регенеративного подогрева $T_{оп}$.

Значения КПД регенеративного цикла для существующей тепловой схемы, представленной на рис. 1 в зависимости от условной мощности представлены в табл. 3.

Таблица 3.
Значения КПД регенеративного цикла для существующей тепловой схемы,
представленной на рис. 1, в зависимости от условной мощности блока

Table 3.
Efficiency values of the regenerative cycle for the existing thermal circuit shown in Figure 1
depending on the nominal power of the unit

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Давление воды перед парогенератором	МПа	6,3	6,3	6,3	6,3	6,4
Давление воды после конденсатора	кПа	5,23	5,23	5,23	5,23	5,10
Энтропия воды перед парогенератором в точке 4'	кДж/(кг·К)	6,583	6,530	6,524	6,521	6,333
Энтропия в точке 1	кДж/(кг·К)	8,378	8,378	8,378	8,378	8,387
Изменение энтропии воды от конденсатора до парогенератора	кДж/(кг·К)	1,796	1,848	1,855	1,858	2,054
Температура отвода тепла	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Теплота, отведенная в холодном источнике (конденсаторе)	кДж/кг	552,4	566,5	568,4	569,4	631,7
Температура подвода пара после парогенератора	К	545,9	547,7	547,7	547,7	547
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Давление пара после парогенератора	МПа	6,30	6,30	6,30	6,30	6,40
Энтальпия конденсата перед парогенератором	кДж/кг	773	794	797	799	912
Теплота, подведенная в горячем источнике (парогенераторе)	кДж/кг	2014	1991	1988	1986	1874
КПД регенеративного цикла	-	0,726	0,715	0,714	0,713	0,663

Регенеративный подогрев характеризуют безразмерной величиной степенью регенерации, отношением фактического подогрева питательной воды к максимально возможному подогреву:

$$\sigma_p = \frac{(T_{оп} - T_2)}{(T_1 - T_2)}. \quad (7)$$

Для смешивающих подогревателей термодинамическая оптимальная степень регенерации, соответствующая максимальному КПД

$$\sigma_p = \frac{(T_{пв}^{опт} - T_2)}{(T_1 - T_2)} = \frac{z}{z+1}. \quad (8)$$

где $T_{пв}^{опт}$ – оптимальная температура питательной воды для смешивающих подогревателей. Вариационные расчеты показывают, что максимум КПД соответствует таким же значениям σ_p и для других подогревателей.

Экономически оптимальная степень регенерации для двухконтурных АЭС, удовлетворяющая этому условию, составляет 85-90 % от термодинамического оптимума

$$\sigma_p^э = k \cdot \sigma_p, \quad (9)$$

где $k = 0,85 - 0,9$.

На тепловой схеме (рис. 1) представлены 8 регенеративных подогревателей. Оптимальная степень регенерации, соответствующая максимальному термодинамическому КПД, равна 0,889. При этом оптимальная температура питательной воды после последнего регенеративного подогревателя, определенная по формуле (8), приведена в табл. 4. Значения экономически оптимальной температуры питательной воды после последней ступени регенеративного подогрева для тепловой схемы (рис. 1), в зависимости от условной мощности блока представлены в табл. 4.

Таблица 4.

Экономически оптимальная температура питательной воды после последней ступени регенеративного подогрева в зависимости от условной мощности блока

Table 4.

Economically optimal temperature of feedwater after the last stage of regenerative heating depending on the nominal power of the unit

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Температура отвода тепла, T_2	К	307,6	306,5	306,5	306,5	307,6
Температура отвода тепла, T_1	К	546	548	548	548	547
Температура конденсата после последнего рег. теплообменника	° С	180	187	188	188	213
Оптимальная температура конденсата после последнего рег. теплообменника	° С	215-225	216-226	216-226	216-226	215-226

Для определения эффекта регенерации используется коэффициент использования энергии (КИЭ), который носит несколько названий, в том числе коэффициент использования энергии (топлива, объема, отдачи, реализации, использования) химического тепла.

Этот коэффициент упоминается в «большой» энергетике [13], так и промышленной [14]

$$\eta_m = \frac{Q_x - Q_{г.ух}}{Q_x}, \quad (10)$$

где Q_x – химическая энергия топлива, которую применительно к атомной энергетике можно заменить на тепловую энергию, поступающую в парогенератор $Q_{пг}$; $Q_{г.ух}$ – энергия уходящих газов, применительно к атомной энергетике заменяется на энергию отвода тепловой энергии в конденсаторе Q_k .

После всех преобразований коэффициент использования энергии применительно к атомной энергетике выражается следующим образом:

$$\eta_m = \frac{Q_{пг} - Q_k}{Q_{пг}}. \quad (11)$$

Из уравнения теплового баланса паротурбинной установки:

$$Q_{пе} = N_{эл} + Q_p + Q_k, \quad (12)$$

где $N_{эл}$ – электрическая энергия, получаемая на клеммах генератора; Q_p – энергия, поступающая в парогенератор от регенеративных отборов.

С учетом изложенного можно записать:

$$Q_k = Q_{пе} - N_{эл} - Q_p, \quad (13)$$

при этом, подставляя в выражение (11) соотношение (13), получаем:

$$\eta_m = \frac{N_{эл} + Q_p}{Q_{пе}}, \quad (14)$$

После добавления в числитель затрат на теплоснабжение Q_t , выражение коэффициента использования энергии (КИЭ) соответствует общепринятому в энергетике:

$$\eta_m = \frac{N_{эл} + Q_p + Q_m}{Q_{пе}}. \quad (15)$$

В табл. 5 приведены результаты расчета коэффициента использования энергии (КИЭ) без учета нагрева питательной воды паром из отборов турбины. В качестве полезной мощности учитывалась условная мощность электрической энергии. Коэффициент определялся по формуле (11). Результаты расчета коэффициента использования энергии (КИЭ) с учетом регенеративных отборов приведены в табл. 6.

Таблица 5.

Коэффициент использования энергии для АЭС без регенеративных отборов

Table 5.

Energy utilization factor for NPP without regenerative extraction

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Расход пара после ПГ	т/ч	4202	5519	5568	5592	5985
Температура пара после парогенератора	°С	272,9	274,7	274,7	274,7	274,0
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Температура пара в конденсаторе	°С	34,6	33,5	33,5	33,5	34,6
Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	145	149,4	149,4	149,4	145
Энтальпия пара после турбины на линии насыщения	кДж/кг	2564	2562	2562	2562	2564
Энтальпия пара после турбины (с учетом влажности)	кДж/кг	2144	2120	2119	2117	2142
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор $Q_{пг}$	МВт	3084	4040	4076	4094	4390
Тепловая энергия, которую необходимо отвести в конденсаторе Q_k	МВт	2334	3020	3046	3057	3320
КИЭ в установке без учета регенерации	-	0,243	0,252	0,253	0,253	0,244

Таблица 6.

Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами

Table 6.

Energy utilization factor for NPPs with regenerative extraction

Условная мощность	МВт	750	1020	1030	1037	1070
Расход пара после ПГ	т/ч	4202	5519	5568	5592	5985
Температура пара после парогенератора	°С	272,9	274,7	274,7	274,7	274,0
Энтальпия пара после парогенератора	кДж/кг	2787	2785	2785	2785	2786
Температура пара в конденсаторе	°С	34,6	33,5	33,5	33,5	34,6

Окончание табл. 6.

Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами

Table 6 (continued)

Коэффициент использования энергии для АЭС с регенеративными отборами

Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	145	149,4	149,4	149,4	145
Энтальпия пара после турбины	кДж/кг	2564	2562	2562	2562	2564
Энтальпия пара после турбины (с учетом влажности)	кДж/кг	2144	2120	2119	2117	2142
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор $Q_{пр}$	МВт	3084	4040	4076	4094	4390
Температура воды перед парогенератором	°С	186	198,2	198,2	198,2	216,6
Энтальпия конденсата после конденсатора	кДж/кг	789,9	844,3	844,3	844,3	928
Тепловая энергия, поступающая в парогенератор от регенеративных отборов	МВт	753	1065	1075	1079	1302
Тепловая энергия, которую необходимо отвести в конденсаторе Q_k	МВт	1581	1955	1972	1977	2019
КИЭ в установке с регенерацией	-	0,487	0,516	0,516	0,517	0,540

Расчеты и результаты исследования

В ходе исследований рассмотрены задачи по определению предельных характеристик, показывающие эффективность эксплуатации энергоблока и проведено их сравнение с реальными значениями энергоблока № 3 с реактором ВВЭР-1000 Калининской АЭС. Рассмотрены варианты с различной мощностью работы блока с условной электрической мощностью от 750 до 1070 МВт. Все экспериментальные значения параметров были получены в ходе промышленного эксперимента на энергоблоке № 3 Калининской АЭС.

Предложены для анализа две целевые функции по оценке эффективности энергосбережения в регенеративных системах регенеративного подогрева воды. Первая функция, ранее известная в энергетике, – КПД регенеративного цикла. При этом определена предельная характеристика энергосбережения, к значению которой необходимо стремиться КПД предельного регенеративного цикла, для получения максимального энергосбережения. Графики зависимости величин КПД регенеративного и предельного регенеративного циклов от величины условной мощности для тепловой схемы паротурбинной установки на энергоблоке № 3 Калининской АЭС представлены на рис. 5.

Вторая функция ранее в атомной энергетике не использовалась, это коэффициент использования энергии (КИЭ). Предельно минимальными значениями КИЭ будут значения, определенные для установок без регенеративных отборов. Максимальным теоретическим (недостижимым) значением коэффициента использования энергии (КИЭ) будет единица. Графики зависимости величин КИЭ для АЭС без регенерации и для АЭС с регенеративными отборами от величины условной мощности для тепловой схемы паротурбинной установки на энергоблоке №3 Калининской АЭС приведены на рис. 6.

Анализ графиков показывает, что есть большой резерв по повышению эффективности использования регенеративных отборов турбин на АЭС. Необходимо во время эксплуатации блоков оценивать приведенные целевые функции, при этом коэффициент регенерации должен стремиться к предельному коэффициенту регенерации, т.е. должен быть как можно меньшим, а коэффициент использования энергии (КИЭ) должен стремиться к единице.

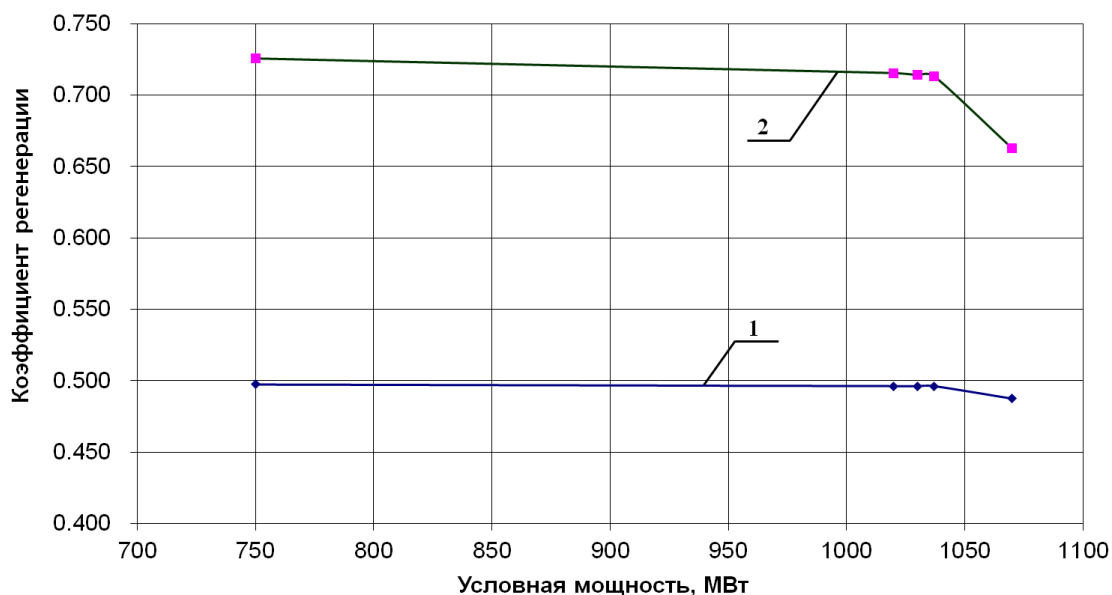


Рис. 5. Коэффициент регенеративного цикла в зависимости от условной мощности:
 1 – коэффициент предельного регенеративного цикла; 2 – коэффициент регенеративного цикла

Fig. 5. Regenerative cycle factor depending on the nominal power:
 1 – limiting regenerative cycle factor; 2 – regenerative cycle factor

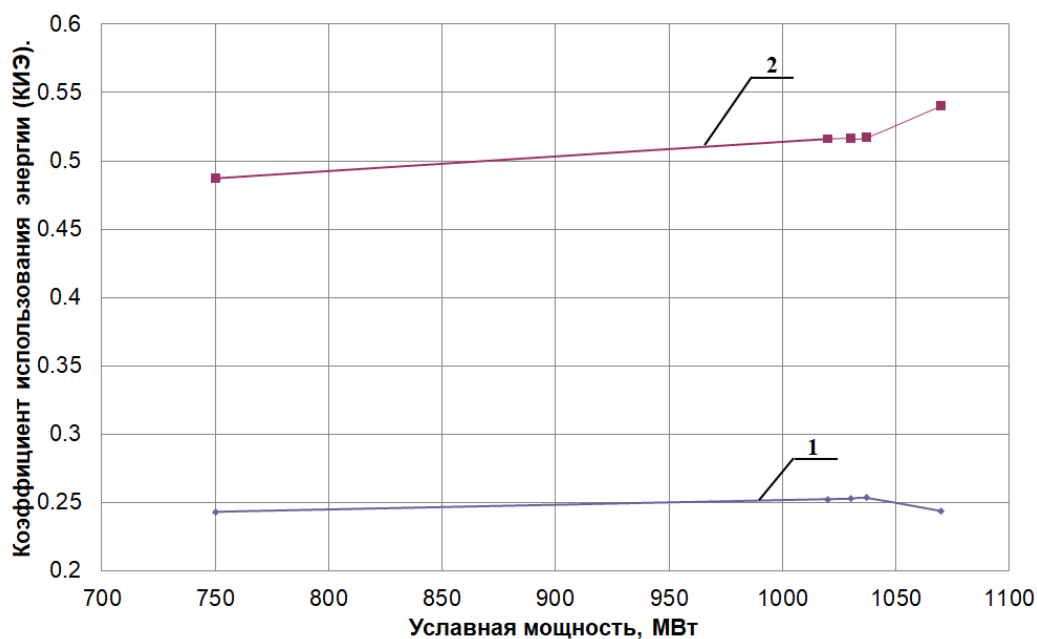


Рис. 6. Коэффициент использования энергии (КИЭ) в зависимости от условной мощности:
 1 – КИЭ без регенеративного подогрева; 2 – КИЭ с регенеративным подогревом

Fig. 6. Energy utilization factor depending on the nominal power:
 1 – without regenerative heating; 2 – with regenerative heating

Выводы

Проанализировано два коэффициента, по которым можно оценить влияние вторичных энергетических ресурсов на эффективность работы энергоблока № 3 Калининской АЭС. В качестве направления по использованию вторичных энергоресурсов второго контура была выбрана регенерация. На основе принципа предельного энергосбережения определены предельные (максимальные) значения этих коэффициентов в зависимости от удельной мощности.

В результате исследования получены следующие выводы.

1. КПД предельного регенеративного цикла для АЭС изменяется от 0,497 до 0,488. С увеличением условной мощности блока АЭС предельный КПД регенеративного цикла уменьшается.
2. Реальный КПД регенеративного цикла на АЭС выше и изменяется от 0,726 до 0,668. Задачей повышения эффективности эксплуатации системы регенерации является максимально приближать значение КПД регенеративного цикла к КПД предельного регенеративного топливного цикла.
3. Проведенный анализ показал минимальные значения коэффициента использования энергии (КИЭ) для АЭС без использования систем регенерации. Значения коэффициента использования энергии варьируются в диапазоне от 0,243 до 0,253. В зависимости значения КИЭ от величины условной мощности наблюдается оптимум. Ниже этого значения КИЭ на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 быть не может.
4. Реальный КИЭ с использованием системы регенеративного подогрева воды паротурбинной установки энергоблока № 3 Калининской АЭС меняется от 0,497 до 0,540. Наилучшее значение этого коэффициента стремится к единице. Это возможно при отсутствии потерь в конденсаторе и при использовании тепловых отходов после турбины для целей теплоснабжения. Установлено, что с увеличением условной мощности коэффициент использования энергии (КИЭ) также увеличивается.
5. Для оценки эффективности систем регенерации второго контура АЭС предложено использовать коэффициент использования энергии (КИЭ) после его модернизации и адаптации к атомной энергетике.

Представленные результаты по анализу эффективности эксплуатации энергоблоков открывают возможность оценки регенеративных систем подогрева воды энергоблоков АЭС с использованием характеристик: КПД регенеративного цикла и коэффициента использования энергии (КИЭ). Предложенные целевые функции позволят составить технико-экономические рекомендации к повышению эффективности эксплуатации энергетического оборудования и систем и полезно использовать подведенную энергию при производстве электрической и тепловой мощностей.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/ (дата обращения 20 марта 2024 г.).
2. Федеральный закон «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 № 170-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] URL https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8450/ (дата обращения 20 марта 2024 г.).
3. Федеральный закон от 21.07.1997 № 116-ФЗ (ред. от 14.11.2023) «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [Электронный ресурс] URL <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-21071997-n-116-fz-o/> (дата обращения 20 марта 2024 г.).
4. **Маргулова, Т.Х.** Атомные электрические станции / Т.Х. Маргулова – М.: Высшая школа, 1978. – 360 с.
5. **Ефимочкин, Г.И.** Совершенствование тепловых схем энергоблоков / Г.И. Ефимочкин, Б.И. Шмуклер, Г.Д. Авруцкий // Теплоэнергетика. 2000. № 4. С. 48-53.
6. **Шарапов, В.И.** Расчет энергетической эффективности усовершенствованных схем подогрева исходной воды в системах регенерации паровых турбин ТЭЦ / В.И. Шарапов, А.В. Кузьмин // Труды Академэнерго. 2017. № 3. С. 53-65.
7. **Ключников, А.Д.** Основные направления реализации предельного энергосбережения в теплотехнологии // Промышленная энергетика. 1986. № 10. С. 3-5.
8. **Данилов, Н.И.** Основы энергосбережения / Н.И. Данилов, Я.М. Щелоков. – Екатеринбург: ГУ СО «Институт энергосбережения», 2008. – 526 с.

9. Турбины тепловых и атомных электрических станций / А.Г. Костюк, В.В. Фролов, А.Е. Булкин, А.Д. Трухний. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 488 с.
10. **Александров, А.А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок / А.А. Александров. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 158 с.
11. **Кудинов, В.А.** Техническая термодинамика и теплопередача / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк, – М.: Юрайт, – 2011. – 560 с.
12. Основные методические положения по планированию использования вторичных энергетических ресурсов // НИИ планирования и нормативов – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 64 с.
13. **Трухний А.Д.** Теплофикационные паровые турбины и турбоустановки/ А.Д. Трухний, В.Б. Ломакин – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 540 с.
14. **Сушон, С.П.** Вторичные энергетические ресурсы промышленности СССР / С.П. Сушон, А.Г. Завалке, М.И. Минц. – М.: Энергия, 1978. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию: 03.04.2024*

*Дата принятия
к публикации: 19.06.2024*