

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ АЭС

С.Е. Щеклеин, О.Л. Ташлыков, А.М. Дубинин

Уральский федеральный университет, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19



Целью работы является анализ и оценка потенциальных путей повышения энергоэффективности атомной энергетики.

Рассмотрены используемые и перспективные термодинамические циклы атомных электростанций в энергетике. Приведены пути повышения параметров рабочего тела в паротурбинном контуре АЭС. Проведена термодинамическая оценка повышения тепловой эффективности АЭС с реакторами на быстрых нейтронах за счет увеличения температуры теплоносителя на выходе из активной зоны реактора и, соответственно, повышения температуры и давления пара, вырабатываемого парогенератором. Выполнен анализ эффективности утилизации низкопотенциальной сбросной тепловой энергии АЭС с использованием тепловых насосов.

Современный уровень развития энергетического машиностроения, создание эффективных высокотемпературных газовых турбин и паровых компрессоров позволяют рассматривать возможность достижения высоких сопряженных параметров пара на АЭС с традиционными легководными реакторами без превышения допустимых условий эксплуатации активных зон с оболочками твэлов из циркониевых сплавов.

Применение тепловых насосов в схеме охлаждения основного конденсатора паротурбинной установки с целью повышения экономических показателей неоправданно. Как показали оценочные расчеты, использование тепловых насосов в схеме основного конденсатора перспективно только для сокращения тепловых сбросов АЭС в окружающую среду. Утилизация низкопотенциальной теплоты, отводимой системами охлаждения оборудования, с использованием тепловых насосов является эффективным путем повышения эффективности АЭС. При этом уменьшается отбор пара из тепловой схемы энергоблока, что приводит к дополнительной выработке энергии при неизменных затратах на ее производство, а также снижает тепловые выбросы в окружающую среду.

Ключевые слова: коэффициент полезного действия, сопряженные параметры пара, огневой перегрев, сбросная теплота, тепловой насос.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергоэффективности экономики страны является одной из приоритетных задач [1 – 3]. Для достижения этой цели в атомной энергетике рассматривают следующие пути:

- увеличение глубины выгорания ядерного топлива;
- повышение установленной мощности действующих энергоблоков путем модернизации оборудования;
- повышение коэффициентов полезного действия АЭС путем совершенствования тепловых схем и термодинамических циклов;

© С.Е. Щеклеин, О.Л. Ташлыков, А.М. Дубинин, 2015

- повышение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ);
- снижение расходов тепловой и электрической энергии на собственные нужды АЭС;
- снижение непроизводительных расходов и потерь энергии;
- использование низкопотенциальной сбросной тепловой энергии.

Наряду с данными задачами, решаемыми эволюционным путем, рассматриваются многочисленные инновационные проекты [4], способные радикально повысить экологическую, энергетическую и экономическую эффективность атомной энергетики.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Технологический цикл АЭС с реакторами на тепловых нейтронах с водным теплоносителем (ЛВР) обладает следующими особенностями.

– Выбор современного давления в первом контуре реакторов ЛВР большой мощности (15,7 МПа) связан с ограничением по температуре, равным 350°C для оболочек твэлов из циркониевых сплавов. Отсюда следует, что предельная температура пара во втором контуре не может превысить 315°C в случае его перегрева. Таким образом, выбор циркониевого сплава для оболочек твэлов и повышение единичной мощности блоков практически предопределили термодинамические параметры АС с ЛВР: давление первого контура около 16 МПа, температура теплоносителя на выходе из реактора 320 – 330°C; давление и температура пара во втором контуре соответственно 6,3 – 7,2 МПа и 279 – 285°C [3].

– Высокая мощность турбоустановок достигается большими расходами пара, что влияет на потери тепловой энергии в конденсаторе паровой турбины. Повышенные невосполнимые тепловые потери в холодном источнике снижают экономичность работы таких энергоблоков, поэтому КПД-брутто современных атомных электростанций, как правило, не превышает 32 – 35 % [3].

В реакторах на быстрых нейтронах (РБН) в качестве теплоносителя используют жидкие металлы, позволяющие отводить значительные удельные тепловыделения. В настоящее время практически во всех энергетических РБН используют жидкий натрий, температура которого на выходе из активной зоны составляет порядка 550°C (температура кипения натрия 878°C). Это позволяет вырабатывать в парогенераторах перегретый пар высоких параметров ($p = 13$ МПа, $t = 505$ °C), повышает термодинамическую эффективность АЭС, открывает перспективы создания ядерно-технологических комплексов для цветной металлургии и химической промышленности. Система с РБН с натриевым теплоносителем и замкнутым ядерным топливным циклом (ЯТЦ) входит в перечень предлагаемых ядерных энергетических систем четвертого поколения, обладающих повышенными показателями в области обеспечения устойчивого развития, конкурентоспособности, безопасности и надежности, а также защиты от распространения ядерного оружия.

ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДВОДА ТЕПЛА В ЦИКЛЕ ЛВР

Среди перечисленных путей повышения энергоэффективности АЭС с ЛВР рассматривается вариант первичного перегрева пара. Однако этот способ повышения КПД цикла, успешно использованный на реакторах канального типа АМБ 100 и АМБ 200, не получил дальнейшего развития, главным образом, из-за необходимости применять для активной зоны реакторов высокотемпературные стали, снижающие эффективность использования уранового топлива. Опыт применения огневого перегрева пара на АЭС «Индиан-Пойнт» (США) не принес ожидаемых ре-

зультатов вследствие термодинамической неэффективности использования перегретого пара низкого давления.

Известно, что максимальная термодинамическая эффективность паросиловых циклов достигается при одновременном повышении начальной температуры и начального давления пара. Наибольшая эффективность достигается при сопряженных параметрах пара (табл.1).

Таблица 1

Сопряженные параметры пара (конечная влажность пара в турбине 13%, внутренний относительный КПД турбины 0,85)

Температура, °C	600	570	540	515	480	450	410
Давление, МПа	20	18	14	12	9	7	5

Современный уровень развития энергетического машиностроения, широкое применение в тепловой энергетике парогазовых циклов, создание эффективных высокотемпературных газовых турбин и паровых компрессоров позволяют рассматривать возможность достижения высоких сопряженных параметров пара на АЭС с традиционными ЛВР без превышения допустимых условий эксплуатации активных зон с оболочками твэлов из циркониевых сплавов путем компрессии и перегрева насыщенного пара газовым топливом.

На рисунке 1 приведена T - q -диаграмма процессов передачи тепла в комбинированной ядерно-тепловой схеме АЭС на базе реактора ВВЭР 1000 (рис. 2).

Очевидно, что наибольшая тепловая мощность, создаваемая установкой, обеспечивается ядерной частью, генерирующей насыщенный пар. Повышение температуры и давления в схеме комбинированной АЭС создается паровым компрессором и последующим перегревом сжатого до 13 МПа пара в пароперегревателе. Привод парового компрессора и перегрев сжатого пара осуществляются при помощи газовой турбины и перегревателя на природном газе.

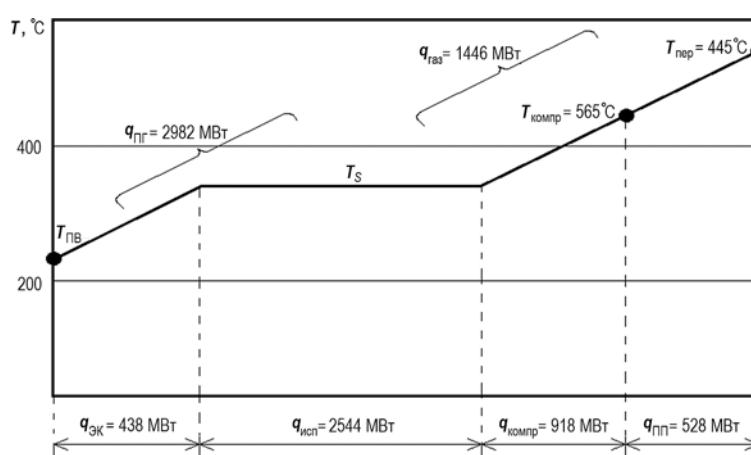


Рис. 1. T - q -диаграмма процессов передачи тепла в комбинированной ядерно-тепловой схеме АЭС на базе реактора ВВЭР-1000

Общий вид термодинамического процесса в T - S -диаграмме приведен в упрощенном виде (без учета системы регенерации и промперегрева) на рис. 3.

Результаты расчета затрат энергии и газового топлива на газотурбинный привод парового компрессора и перегрев пара в газовом пароперегревателе даны в табл. 2.

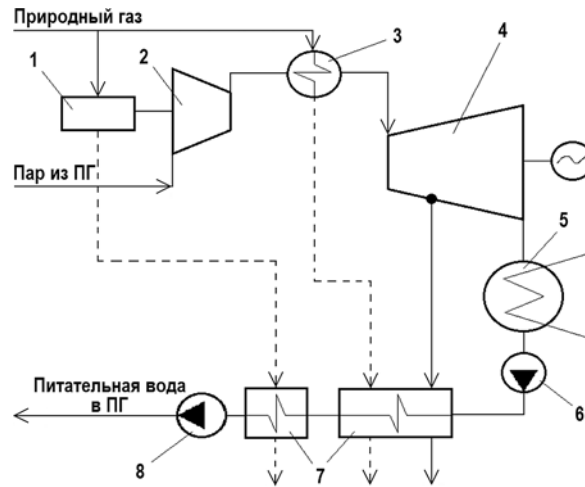


Рис. 2. Принципиальная схема комбинированной ядерно-тепловой АЭС: 1 – газотурбинный двигатель; 2 – паровой компрессор; 3 – пароперегреватель; 4 – паровая турбина перегретого пара; 5 – конденсатор паровой турбины; 6 – конденсатный насос; 7 – система регенерации; 8 – питательный насос

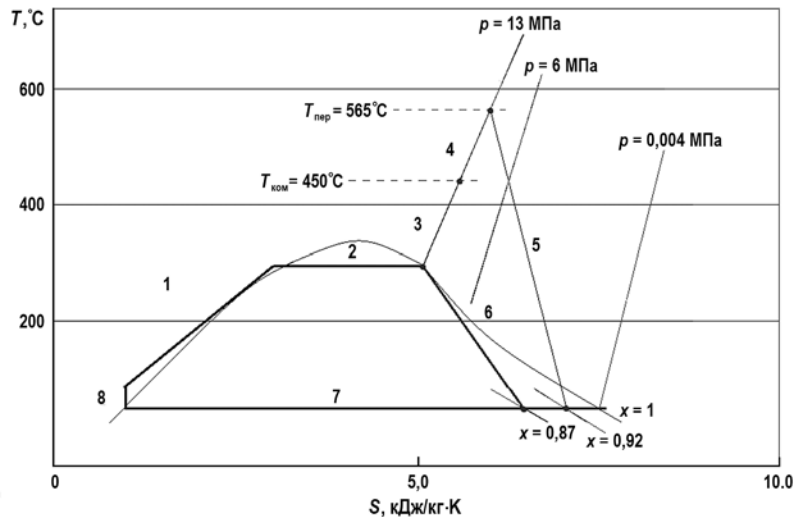


Рис. 3. Термодинамический процесс комбинированной ядерно-тепловой АЭС в T-S-диаграмме: 1 – экономайзерный участок ПГ ЯЭУ; 2 – испарительный участок ПГ ЯЭУ; 3 – сжатие и нагрев пара в паровом компрессоре; 4 – перегрев пара в газовом пароперегревателе; 5 – расширение пара в паротурбинной установке перегретого пара; 6 – расширение пара в паротурбинной установке насыщенного пара; 7 – процесс конденсации пара; 8 – процесс сжатия в насосе

Таблица 2

Параметры пара и затраты энергии и газового топлива

Параметры пара	Давление, МПа	Температура, °С	Мощность, МВт	Расход газа, м³/ч
Выход ПГ ЯЭУ	5,9	300		
После парового компрессора	13	450	918	54
После газового пароперегревателя	13	565	528	31

В реальных схемах турбин насыщенного пара широко используется промежуточный перегрев пара после достижения им предельно-допустимой влажности. На ри-

сунке 4 приведено сопоставление процессов работы паротурбинной установки (ПТУ) насыщенного и перегретого сжатого пара с промежуточным перегревом.

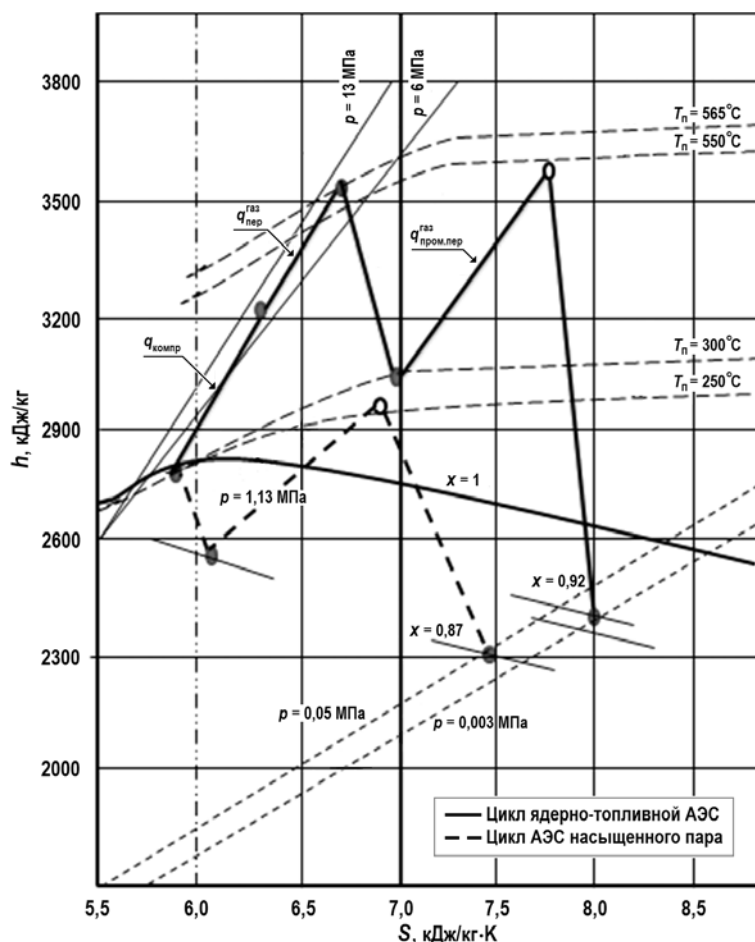


Рис. 4. h - S -диаграмма процессов работы паротурбинной установки насыщенного и перегретого сжатого пара с промежуточным перегревом

Из диаграммы видно наличие положительного эффекта и в этом случае. Значительное превышение энтальпии поступающего на турбину перегретого пара над насыщенным уменьшает необходимый расход пара для выработки одной и той же мощности при одинаковых давлениях в конденсаторах турбин.

На рисунке 5 в качестве примера показано соотношение размеров турбин, работающих на перегретом (К-210-130, К-500-16,7) и насыщенном (К-220-44, К-500-60, К-500-65) паре. Заметим, что паровая турбина К-500-16,7 (давление свежего пара указано в МПа) предназначена для работы в составе блока АЭС «Калпакам» (Индия) с реакторной установкой на быстрых нейтронах (PFBR).

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПOTЕНЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ АЭС

АЭС являются крупными источниками низкопотенциальной тепловой энергии, не пригодной для промышленного использования вследствие низкого температурного уровня. Однако мировой опыт показывает реализуемость на современной технологической базе возможности повышения (трансформации) температурного уровня с помощью тепловых насосов до уровня, необходимого для целей тепло-

снабжения. В настоящее время предлагаются различные варианты использования тепловых насосов парокompрессионного типа, обладающих высокими коэффициентами трансформации и позволяющими обеспечить перераспределение тепловых потоков в схеме ПТУ, оптимизировать сетевые установки и снизить сброс тепловой энергии с охлаждающей водой [5, 6].

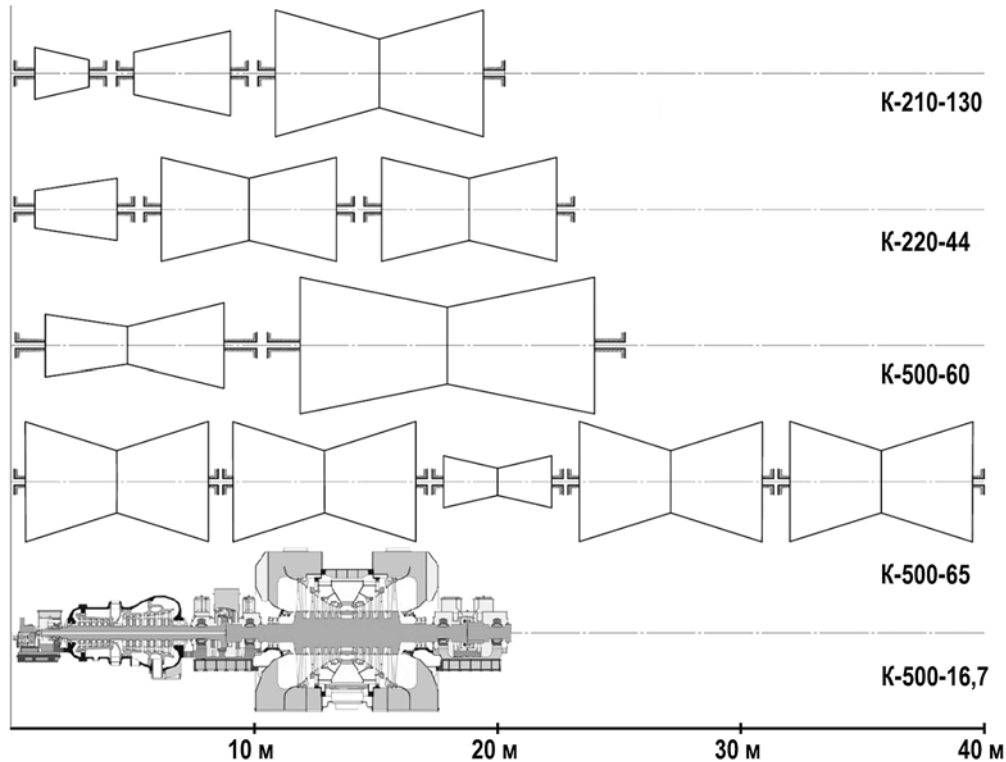


Рис. 5. Соотношение размеров турбин, работающих на перегретом и насыщенном паре

Для оценки возможности утилизации сбросной низкопотенциальной теплоты были исследованы режимы работы и параметры вспомогательных систем реакторного и турбинного отделений АЭС с реактором БН-600.

подавляющая часть всех тепловых сбросов АЭС уносится с охлаждающей водой из основных конденсаторов турбин. Данный источник низкопотенциальной теплоты характеризуется неравномерностью температуры воды в водохранилище в течение года, низким значением температуры охлаждающей воды в осенне-зимний период.

Использование теплового насоса в технологической схеме АЭС

Для оценки эффективности использования теплового насоса в схеме ПТУ АЭС был выбран вариант, в котором теплоту можно отбирать от воды на входе или на выходе конденсатора турбины. При этом конденсатор теплового насоса подключается к системе регенеративного подогрева и заменяет первый подогреватель низкого давления (рис. 6).

При такой схеме подключения конструкция ПТУ АЭС требует минимальных вмешательств. В данной схеме испаритель теплового насоса устанавливается в подводящий или отводящий канал охлаждающей воды, что значительно упрощает его монтаж.

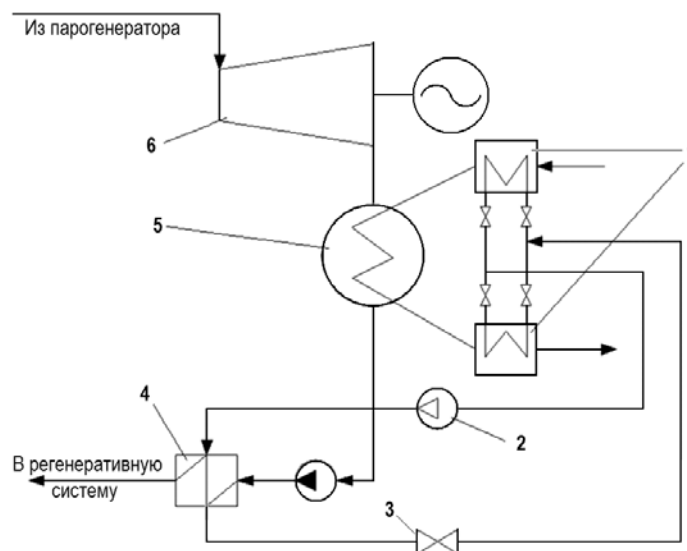


Рис. 6. Принципиальная тепловая схема подключения теплового насоса: 1 – испаритель теплового насоса; 2 – компрессор теплового насоса; 3 – дросселирующее устройство; 4 – подогреватель низкого давления (ПНД-1); 5 – конденсатор турбины; 6 – турбина

При подключении испарителя теплового насоса к охлаждающей воде на входе в конденсатор повышение вырабатываемой турбиной мощности происходит за счет двух факторов [7]:

- увеличивается расход пара в последних ступенях турбины за счет того, что подогрев конденсата в ПНД-1 осуществляется тепловым насосом, а не отбираемым паром;

- появляется возможность увеличения срабатываемого теплоперепада на последних ступенях турбины за счет понижения давления насыщения в конденсаторе в результате отбора тепла испарителем теплового насоса от охлаждающей воды и понижения ее температуры.

При подключении испарителя теплового насоса к охлаждающей воде на выходе из конденсатора увеличение мощности турбины достигается только за счет первого фактора. Однако, так как температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора выше, чем на входе, работа теплового насоса более эффективна.

При подключении теплового насоса к охлаждающей воде на входе в конденсатор увеличиваются дополнительно вырабатываемая мощность и затраты энергии на тепловой насос. Во втором случае дополнительно вырабатываемая мощность будет меньше, но меньше будут и затраты электроэнергии на компрессор теплового насоса.

В приведенном варианте расчета использованы данные среднемесячных значений температуры воды в Белоярском водохранилище за 2007 г. При этом максимальные значения температуры воды составили 25,8°C на входе и 34,6°C на выходе конденсатора.

Для определения дополнительной электрической мощности, вырабатываемой энергоблоком, при подключении испарителя теплового насоса ко входу в конденсатор рассчитывались уменьшение температуры охлаждающей воды и параметры насыщения в конденсаторе. Результаты математического моделирования показывают, что мощность, необходимая для работы компрессора теплового насоса, выше дополнительно вырабатываемой энергоблоком электрической мощности при размещении испарителя как на входе, так и на выходе охлаждающей воды основного конденсатора турбины.

С экологической точки зрения, результаты расчетов позволяют рассматривать возможность использования теплового насоса в схеме основного конденсатора ПТУ для сокращения тепловых сбросов АЭС в окружающую среду (рис. 7), что в ряде случаев может иметь важное значение.

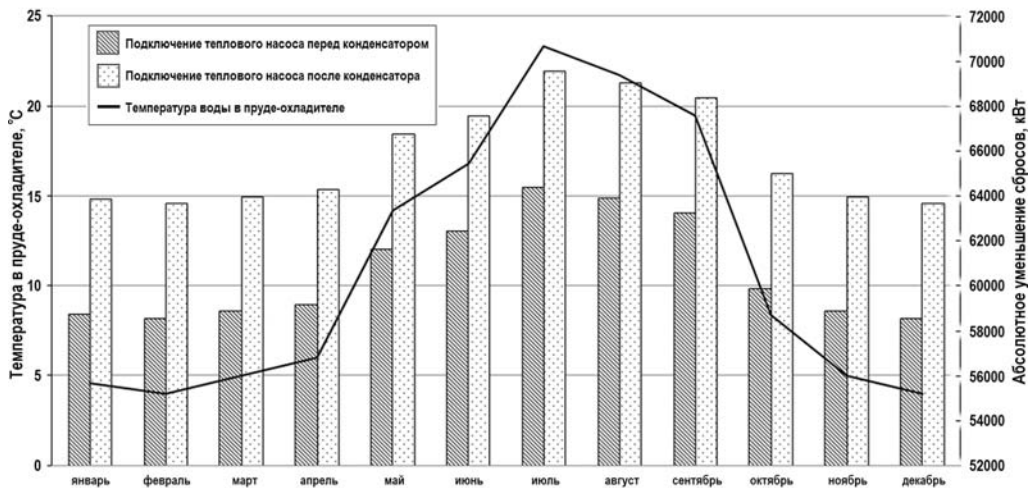


Рис. 7. Абсолютное уменьшение тепловых сбросов энергоблока электрической мощностью 600 МВт с реактором на быстрых нейтронах

Использование тепловых насосов в схемах отпуска тепла потребителю

Другим вариантом утилизации низкопотенциальной теплоты с помощью тепловых насосов является отопление административных, бытовых и производственных зданий АЭС близлежащего города. В настоящее время теплота для этих целей берется из отборов рабочего пара турбины, что понижает выработку АЭС. Использование для целей теплоснабжения теплоты, вырабатываемой тепловыми насосами с коэффициентом трансформации $K_t = 4$, позволяет

- снизить тепловые сбросы в окружающую среду;
- исключить (или снизить) отборы пара на теплофикационные нужды.

Анализ показывает, что данное техническое решение является энергетически целесообразным [8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение энергоэффективности атомных электростанций является одной из приоритетных задач отрасли, решаемых путем модернизации оборудования действующих и разработки инновационных проектов АЭС.

Современный уровень развития энергетического машиностроения, создание эффективных высокотемпературных газовых турбин и паровых компрессоров позволяют рассматривать возможность достижения высоких сопряженных параметров пара на АЭС с традиционными ЛВР без превышения допустимых условий эксплуатации активных зон с оболочками твэлов из циркониевых сплавов.

Применение тепловых насосов в схеме охлаждения основного конденсатора ПТУ для повышения экономических показателей неоправданно. Как показали оценочные расчеты, использование тепловых насосов в схеме основного конденсатора перспективно только для сокращения тепловых сбросов АЭС в окружающую среду.

Утилизация низкопотенциальной теплоты, отводимой системами охлаждения, с использованием тепловых насосов в схемы отпуска тепла потребителю является эффек-

тивным путем повышения эффективности АЭС. При этом уменьшается отбор пара из тепловой схемы энергоблока, что приводит к дополнительной выработке энергии при неизменных затратах на ее производство, а также снижает тепловые выбросы в окружающую среду.

Литература

1. *Асмолов В.Г., Семченков Ю.М., Сидоренко В.А.* Облик АЭС с легководными энергетическими реакторами следующего поколения // VII Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: 2010, С.3-14.
2. *Хоменок Л.А., Кругликов П.А., Смолкин Ю.В., Соколов К.В.* Определение энергетического эффекта модернизации энергооборудования и технологических систем АЭС // Теплоэнергетика. 2012. № 5. С. 10.
3. *Щепетина Т.Д.* О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. №12. С.21-29
4. *Pioro I.L., Kirillov P.L., Mokry S.J., Gospodinov Y.K.* 2008b. Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube: Normal, Improved and Deteriorated Regimes, Proceedings of the International Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP). Anaheim, CA, USA, June 8-12, Paper #8333, Pages 10. Special Metals, 2007. Inconel Alloy 718SPF, A Precision Castparts Corp. Company, 16 pages.
5. *Стенин В.А.* Способ работы тепловой электрической станции / Патент РФ № 2247840 от 10.03.2005. МПК F01K13/00. № 2003101028/06 14.01.2003.
6. *Ефимов Н.Н., Лапин И.А., Малышев П.А., Попов Р.В., Радаев П.Н., Черны А.В., Лемешев А.А., Каратаев Г. Б., Скубиенко С.В., Ощепков А.С.* Тепловая электрическая станция / Патент РФ № 81259 от 23.05.2007. МПК F01K13/00. №2007119246/22. Опубликовано 10.03.2009.
7. *Ташлыков О.Л., Толмачев Е.М., Семенов М.Ю., Сапожников Б.Г.* Снижение тепловых нагрузок АЭС на окружающую среду путем использования тепловых насосов в схеме основного конденсатора паротурбинной установки // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 16-21.
8. *Ташлыков О.Л., Ковин И.В., Кокорин В.В.* Утилизация низкопотенциальной теплоты АЭС с реактором на быстрых нейтронах с использованием теплового насоса // Альтернативная энергетика и экология. 2012. № 3. С. 22-25

Поступила в редакцию 07.12.2015 г.

Авторы

Щеклеин Сергей Евгеньевич, профессор, доктор техн. наук
E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Ташлыков Олег Леонидович, доцент, кандидат техн. наук
E-mail: otashlykov@list.ru

Дубинин Алексей Михайлович, профессор, доктор техн. наук
E-mail: amdubin@urfu.ru

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF NPPShcheklein S.E., Tashlykov O.L., Dubinin A.M.Ural Federal University
19, Mira st., Yekaterinburg, 620002 Russia

ABSTRACT

The aim of this work is to analyze and estimate potential ways to improve the energy efficiency of nuclear power. The article describes the currently used and advanced thermodynamic cycles of nuclear power plants. The ways to improve the working fluid parameters in the NPP steam turbine circuit are given. It is done the thermodynamic estimation of the fast reactors NPP thermal efficiency improve by increasing the temperature of the coolant at the reactor core outlet and, accordingly, increase of the temperature and pressure of steam generated by the steam generator. The analysis of the efficiency of utilization of low potential heat from the NPP relief NPP with heat pumps was performed.

Conclusions. The present level of power engineering development, the creation of effective high-temperature gas turbines and steam compressors allow to consider the possibility of achieving higher steam parameters at NPPs with traditional light water reactors without exceeding the permissible operating conditions of cores with cladding of zirconium alloy.

The use of heat pumps in the main steam cooling system in order to improve the economic performance is not efficient. The estimation showed that using of heat pumps in the main turbine condenser circuit allows only to reduce thermal nuclear discharges into the environment.

Disposal of low-grade heat from equipment cooling systems with heat pumps is an effective way to improve the efficiency of the NPP. This decreases the steam extraction from the unit circuit, resulting in an additional energy generation with the same production costs, and also reduces heat emissions to the environment.

Key words: efficiency, coupled parameters of steam, fire overheating, waste heat, heat pump.

REFERENCES

1. Asmolv V.G., Semchenkov Y.M., Sidorenko V.A. The appearance of light water nuclear power reactors of the next generation. Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference « Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power ». Moscow. 2010, pp. 3-14 (in Russian).
2. Chomenock L.A., Kruglikov P.A., Smolkin Y.V., Sokolov K.V. Determination of the modernization effect of energy power equipment and technological systems of nuclear power plants. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, p. 10 (in Russian).
3. Chomenock L.A., Kruglikov P.A., Smolkin Y.V., Kazarin A.I., Legutenko S.K. Comprehensive optimization of the parameters of the low-grade part of the turbine NPP-2006. *Teploenergetika*. 2011, no.1, pp. 59-61 (in Russian).
4. Pioro, I.L., Kirillov, P.L., Mokry, S.J., Gospodinov, Y.K., 2008b. Supercritical Water Heat Transfer in a Vertical Bare Tube: Normal, Improved and Deteriorated Regimes, Proceedings of the International Congress on Advanced Nuclear Power Plants (ICAPP). Anaheim, CA, USA, June 8-12, Paper #8333, Pages 10. Special Metals, 2007. Inconel Alloy 718SPF, A Precision Castparts Corp. Company, 16 pages.
5. Stenin V.A. Method of operating a thermal power station: patent RU № 2247840 from 10.03.2005. IPC F01K13/00. № 2003101028/06 14.01.2003 (in Russian).
6. Efimov N.N, Lapin I.A., Malyshev P.A., Popov R.V., Radaev P.N., Cherni A.V., Lemeshev A.A.,

Karataev G. B., Skubienko S. V., Oshchepkov A. S. Thermal power station: patent RU №81259 from 23.05.2007. IPC F01K13/00. №2007119246/22 10.03.2009 (in Russian).

7. Tashlykov O. L., Tolmachev E. M., Semenov M. Y., Sapozhnikov B. G. Snizhenie teplovyh nagruzok AES na okruzhayushchuyu sredu putyom ispol'zovaniya teplovyh nasosov v sheme osnovnogo kondensatora paroturbinoj ustanovki [Reducing heat loads NPP on the environment through the use of heat pumps in the circuit of the main steam turbine condenser]. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal «*Alternative Energy and Ecology*»]. 2012, no. 3, pp. 16-21.

8. Tashlykov O. L., Kovin I. V., Kokorin V. V. Utilizaciya nizkopotencial'noj teploty AES s reaktorom na bystryh neytronah s ispol'zovaniem teplovogo nasosa [Disposal of low-grade heat from the nuclear reactor on fast neutrons with heat pump]. *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya* [International Scientific Journal «*Alternative Energy and Ecology*»]. 2012, no. 3, pp. 22-25.

Authors

Shcheklein Sergej Ewgen'evich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

Tashlykov Oleg Leonidovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: otashlykov@list.ru

Dubinin Aleksej Mihajlovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: amdubinin@urfu.ru