

УДК 621.039

РОЛЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ В РАСШИРЕНИИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ БАЗЫ И СОХРАНЕНИИ КЛИМАТА

С. Е. Щеклеин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

В статье приведено расчетное обоснование концепции расширения топливно-энергетической базы и снижения объемов эмиссии парниковых газов при совместном использовании органического и ядерного топлива в структуре гибридных атомно-тепловых электростанций. Показано, что технологическая схема (выработка насыщенного пара в ядерной паропроизводящей установке (ЯППУ), а затем перегрев до максимально достигнутых в теплоэнергетике параметров за счет органического топлива) приводит к снижению удельных расхода газового топлива на производство электрической энергии на 25–30 %, выбросов продуктов сгорания в 2,5 раза (по сравнению с ТЭС), потребления технической воды (по сравнению с АЭС) – в 1,5 раза. Указывается на возможность расширения топливной базы современной ядерной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах путем использования освоенных (реакторы бридеры) и перспективных (гибридные термоядерные реакторы) технологий. Коренное достоинство рассмотренного комплекса – ЯППУ-ТЭС – его реализуемость в короткий период времени со значительным снижением углеродного следа в единице произведенной энергии, что является важным условием устойчивого роста энергетического производства при сохранении экологического равновесия в геосфере.

Ключевые слова: органическое топливо, ядерное топливо, перегрев, продукты сгорания, экология, бридеры, гибридные термоядерные реакторы

В XXI в. становятся все более очевидными следующие проблемы, угрожающие устойчивости существования нашей цивилизации:

- недостаточность топливно-энергетических ресурсов для обеспечения все возрастающих потребностей в энергии даже на ближайшие десятилетия;
- аномально высокий и все возрастающий уровень воздействия энергетики и транспорта на атмосферу, гидросферу и биосферу, приводящий к негативным климатическим изменениям;
- наметившаяся во многих регионах мира тенденция к возникновению дефицита пресной воды.

Становится все более ясным, что существующие и вновь создаваемые альтернативные технологии топливообеспечения и производства тепловой и электрической энергии не способны решить эти проблемы, будучи обособленными. Решения следует искать на пути совместного (синергетического) использования всей суммы знаний и технических достижений, имеющихся во всех отраслях энергетики. Перечислим их:

Атомная энергетика:

- создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности водоохлаждаемых паропроизводящих установок типа ВВЭР (PWR) и АЭС на их основе [1];

- создание и многолетняя валидация АЭС с реакторами на быстрых нейтронах типа БН, способных в ближайшей перспективе обеспечить бридинг (вовлечение в топливный цикл атомной энергетики урана-238 и ОЯТ реакторов ВВЭР), что создает основы замыкания ядерного топливного цикла (ЗТЦ) и многократно расширяет топливную базу атомной энергетики для всех типов реакторов [2];
- решение основных теоретических проблем создания нового поколения реакторов бридеров типа БРС с более высокой эффективностью бридинга [3];
- успехи в создании установок управляемого термоядерного синтеза – источника нейтронов для нереакторного бридинга, что открывает возможность наработки плутония-239 для существующих АЭС всех типов (ВВЭР, БН, БРС и др.) [4].

Тепловая энергетика:

- создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности ТЭС, работающих на сверхкритических параметрах пара, обеспечивающих КПД свыше 40 %;
- создание и валидация ТЭС, работающих на суперсверхкритических параметрах пара (USC), обеспечивающих КПД до 50 %;
- создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности ТЭС, работающих по комбинированному парогазовому циклу (ПГУ), способных обеспечить КПД свыше 55 %, минимальный расход органического топлива, технической воды и выход продуктов сгорания.

Возобновляемая энергетика:

- создание доведение до высокого уровня надежности и эффективности крупных ГЭС, способных генерировать высокую мощность и осуществлять суточное и сезонное регулирование энергопроизводства в соответствии с изменением объемов (графиков) энергопотребления;
- создание и промышленное освоение крупных и малых фотоэлектрических станций, способных к максимальному энергопроизводству в пиковые (дневные) часы энергопотребления;
- разработка и промышленное освоение крупных и малых ветроэлектрических установок с единичной мощностью агрегатов выше 10 МВт и создание на их основе ВЭС гигаватного класса.

В данной работе рассматривается возможность решения перечисленных в начале статьи проблем с использованием уже полностью освоенных технологий атомной и тепловой энергетики. Делается попытка преодоления современных температурных ограничений АЭС с легководными реакторами [5].

Структурная схема энергетической системы гибридного типа приведена на рис. 1.



Рисунок 1. Схема энергетической системы гибридного типа

В этой схеме ядерная паропроизводящая установка (ЯППУ) АЭС, включающая реактор, парогенератор и другое оборудование 1-го контура, генерирует насыщенный пар, который далее поступает в котел-пароперегреватель, обогреваемый органическим топливом. Способы повышения КПД цикла путем перегрева пара успешно использовались на кипящих реакторах канального типа АМБ (Россия) и корпусного типа «Гроссвальцгейм» (ФРГ), но не получили дальнейшего развития главным образом из-за необходимости применять высокотемпературные стали, снижающие эффективность использования уранового топлива в реакторах на тепловых нейтронах. Применение неядерного огневого перегрева пара в 60–70-х гг. на АЭС «Индиан-Пойнт-1», «Элк-Ривер» (США), «Линген» (ФРГ) было вынужденной мерой борьбы с большой влажностью пара в турбинах, вызывающей трудности при их эксплуатации вследствие низких начальных параметров генерируемого пара [6].

Уровень термодинамических параметров пара современных АЭС существенно выше, как и экологические требования к современным ТЭС. В связи с этим возникает интерес к анализу возможностей синергетического использования ТЭС и АЭС.

В данной работе при помощи пакета United Cycle [7, 8], предназначенного для решения задач определения наилучших структуры и состава оборудования теплоэнергетического объекта и расчета стационарных эксплуатационных режимов работы, выполнен анализ эффективности экологического воздействия гибридной атомно-тепловой электростанции на базе ЯППУ Российского проекта АЭС с реактором ВВЭР-1200. Пакет United Cycle отличается:

- высокая степень детализации тепловой схемы моделируемого объекта;
- выверенные и отлаженные в течение многолетней эксплуатации модели элементов оборудования;
- высокая точность сведения материального и теплового баланса;

- многоуровневая система тестирования на каждом шаге создания модели, расчета и анализа результатов режимов работы;
- высокоразвитая графическая среда разработки и визуализации результатов.

Выполнено моделирование трех вариантов АТЭС:

- 1 – проектный цикл К-1200-6,8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200;
- 2 – цикл с начальным перегревом и одной ступенью промперегрева;
- 3 – цикл с компрессией, перегревом и двумя ступенями промперегрева.

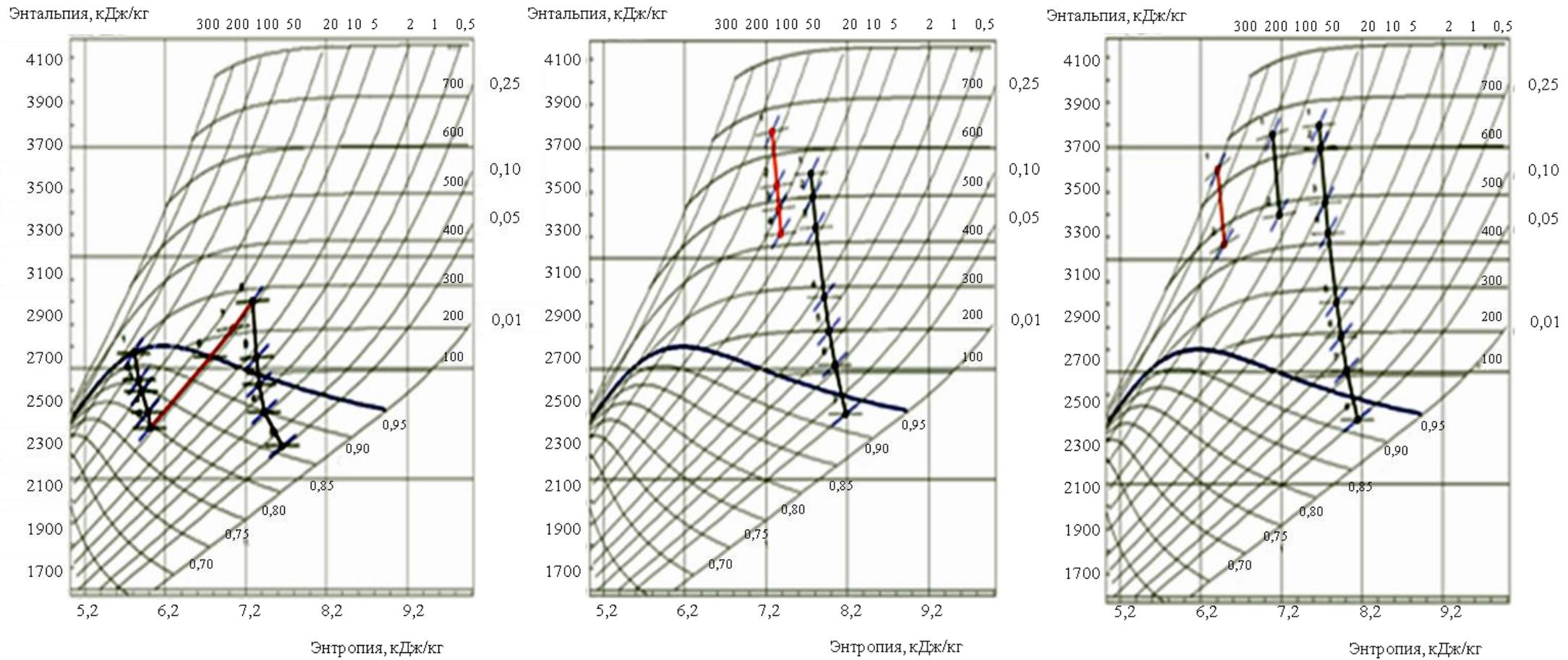
Первый вариант основан на принятых проектных решениях с использованием паровой турбины, работающей на насыщенном паре, генерируемом в парогенераторе АЭС. Второй вариант предполагает использование огневого перегрева насыщенного пара (за счет газового топлива) без изменения давления пара в котле-пароперегревателе и в промежуточном пароперегревателе. Третий вариант предполагает компрессию и огневого перегрев пара до уровня суперсверхкритических параметров, достигнутого в современной тепловой энергетике (30 МПа, 650 °С), с двумя ступенями промежуточного перегрева.

Термодинамические диаграммы данных циклов приведены на рис. 2. Результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Интегральные характеристики результатов расчета

Тип электростанции	АЭС ВВЭР - 1200	АТЭС с ЯППУ и начальным перегревом пара	АТЭС с ЯППУ, начальной компрессией и перегревом пара
Параметры	Значения		
Расход насыщенного пара, кг/с	1 794,86	1 794,86	1 794,86
Тепловая мощность, подводимая к рабочему телу в ПГ, МВт	3 210,34	3 242,91	3 240,75
Суммарная тепловая мощность котла, МВт	0	2 255,44	2 375,10
Расход газа в котле, м ³ /с	0	65,26	68,72
Мощность компрессора, МВт	0	0	717,86
Электрическая мощность ПТУ (брутто), МВт	1 162,52	2 359,35	2 476,65
Электрическая мощность ПТУ (нетто), МВт	1 140,97	2 336,54	2 453,72
КПД цикла (брутто), %	36,21	42,91	44,10
КПД цикла (нетто), %	35,54	42,50	43,69
Доля ЯППУ в производстве энергии, %	100	59	58
Углеродоемкость производства энергии, гр/кВт*ч	0	150	160

В качестве примера на рис. 3 приведена расчетная тепловая схема одного из вариантов.



а

б

в

Рисунок 2. h-S диаграммы вариантов АЭС и АТЭС: а – проектный цикл К-1200-6,8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200, б – цикл с начальным перегревом + 1 ст. промперегрева, в – цикл с компрессией и перегревом + 2 ст. промперегрева

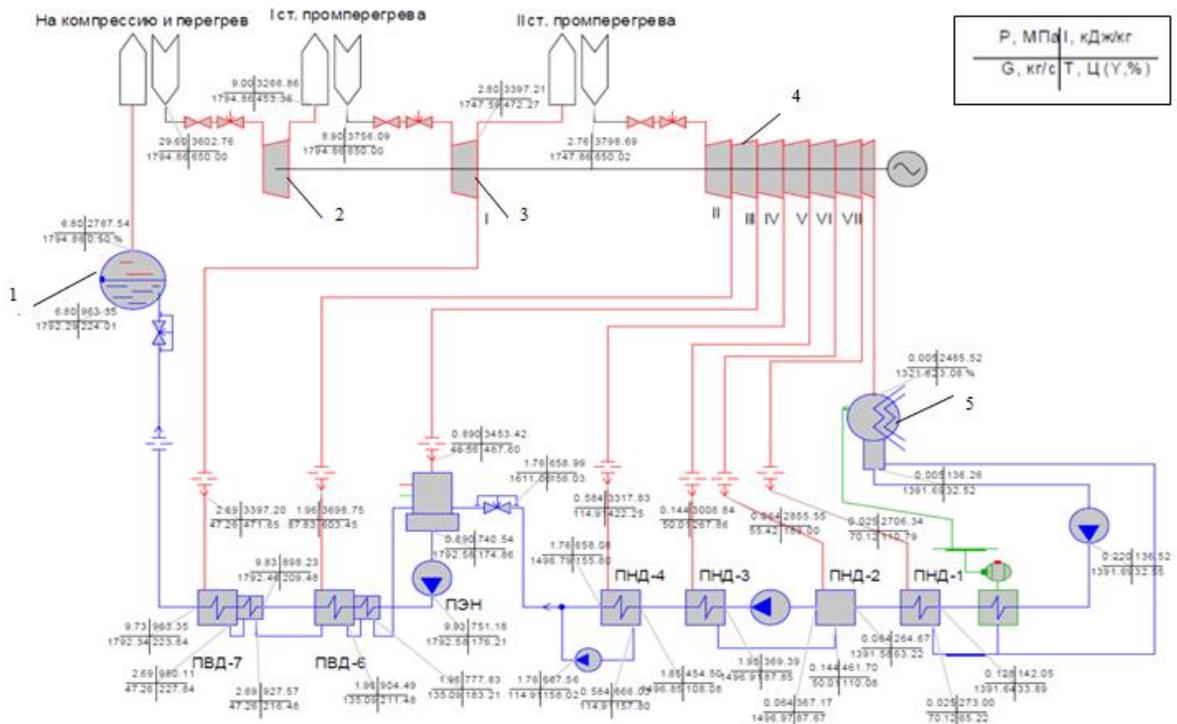


Рисунок 3. Расчетная тепловая схема цикла с начальной компрессией и перегревом и двумя ступенями промперегрева пара: 1 – парогенератор ЯППУ; 2 – ЦВД; 3 – ЦСД; 4 – ЦНД; 5 – конденсатор пара ПТУ

На рис. 4 а,б,в приведены характеристики базового (ВВЭР-1200) и модифицированных вариантов АТЭС на основе базового варианта.

Из приведенных данных следует, что использование насыщенного пара, производимого ЯППУ для дальнейшего перегрева органическим топливом, позволяет значительно повысить электрическую мощность и повысить КПД комплекса, при существенном снижении удельного расхода органического топлива.

Для сравнения приведем характеристики Пермской ГРЭС (таблица 2), имеющей значение электрической мощности – 2400 МВт с турбинами К-800-240-5 на сверхкритические параметры пара (ТЭС СКП), основное и резервное топливо которой природный газ.

Таблица 2. Характеристики Пермской ГРЭС по данным годового отчета за 2013 г. [9]

Параметры	Значения
Выработка электроэнергии, млн кВт·ч	15 819,835
Отпуск тепла, тыс. Гкал	291,848
КИУМ, %	75,25
Расход топлива, Газ, млн м ³	4 083,75
Углеродоемкость производства энергии, гр/кВт*ч	400

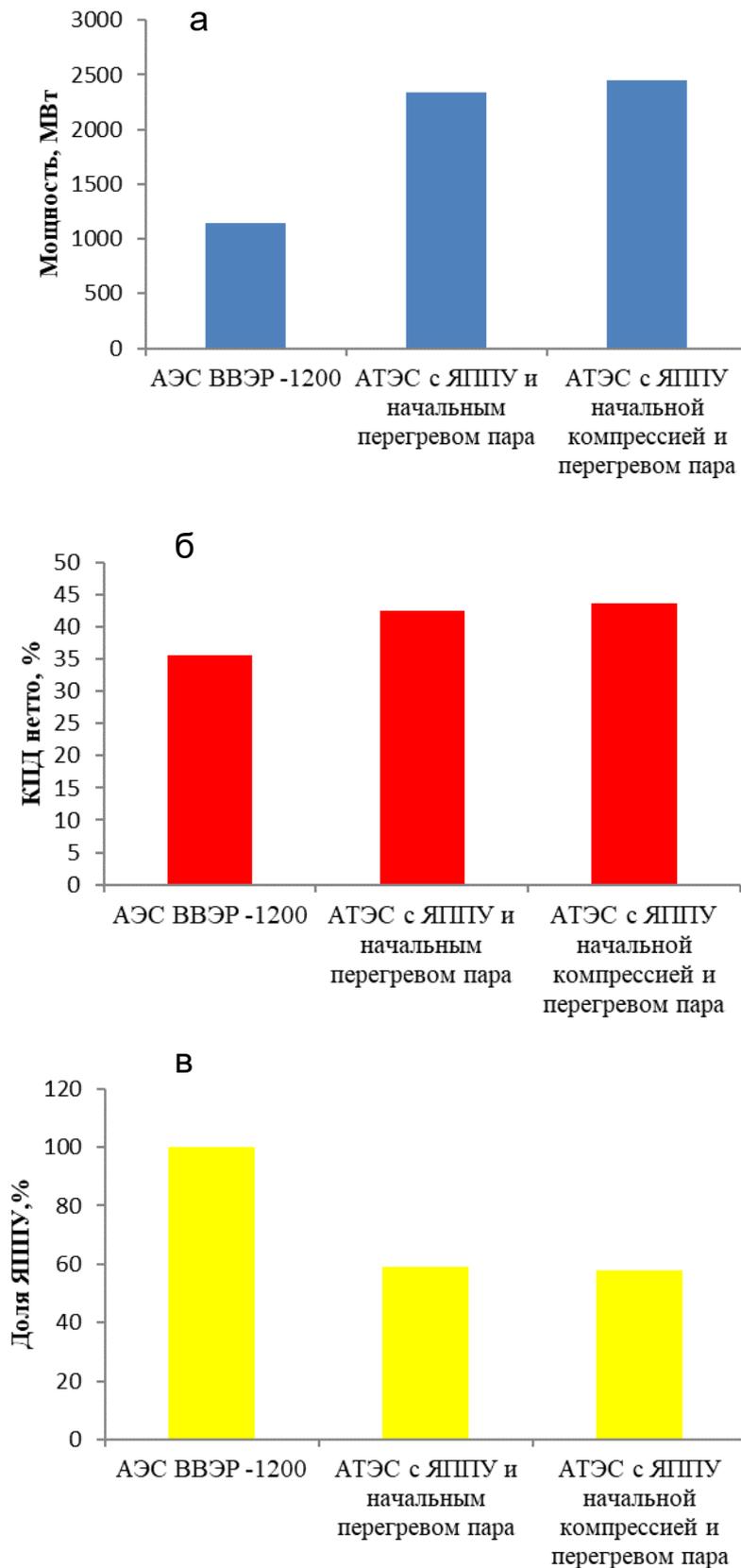


Рисунок 4. Сравнительные характеристики базового и модифицированных вариантов: а – мощность, б – КПД, в – доля ЯПГУ

На рис. 5 приведены сравнительные характеристики ТЭС, АЭС и АТЭС, а также данные по углеродоемкости производства энергии на новом парогазовом блоке Пермской ГРЭС.

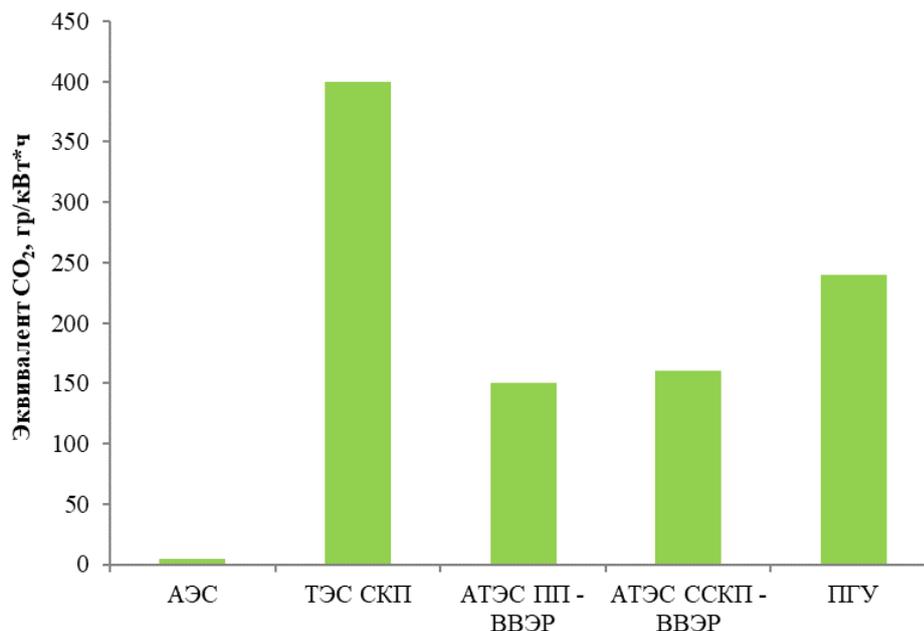


Рисунок 5. Удельная эмиссия парниковых газов в зависимости от типа электростанции

Очевидно, что повышение параметров пара и снижение расхода органического топлива на единицу произведенной энергии приводят к снижению выхода продуктов сгорания, в т. ч. газов представляющих опасность повышения парникового эффекта, что радикально повышает экологическую толерантность использования органического топлива на ТЭС.

Подобная технологическая схема (выработка пара на АЭС, а затем перегрев до максимально достигнутых в теплоэнергетике параметров за счет органического топлива) становится еще более привлекательной при использовании ЯППУ, способных генерировать пар высоких параметров (БН, БРС, СВБР, ВТГР) [10,11].

Заключение

Современный уровень развития крупномасштабных энергетических станций в Российской Федерации и в мире характеризуется:

- высокими мощностями и уровнем надежности АЭС с легководными ядерными реакторами на тепловых нейтронах типа ВВЭР;
- выдающимися достижениями по освоению АЭС с реакторами бридерами на быстрых нейтронах типа БН;
- освоением в тепловой энергетике ТЭС, работающих на закритических и суперсверхкритических параметрах пара (недоступных для современных АЭС).

Единственный реальный путь радикального снижения экологических нагрузок от энергетических объектов в обозримой перспективе – это создание гибридной энергетики на основе освоенных технологий ВВЭР с использованием неядерного огневого перегрева пара до параметров современных ТЭС и восполнения ядерного топлива путем использования реакторов бридеров (БН, БРС), а в будущем гибридных термоядерных реакторов.

Электростанции, реализующие такие циклы, – это пример сочетания свойств АЭС и ТЭС. По сравнению с обычной АЭС они обладают более высоким КПД, меньшей величиной удельных капиталовложений, а по сравнению с обычной ТЭС – меньшим потреблением топлива, меньшими выбросами продуктов сгорания, а также меньшей величиной топливной составляющей себестоимости энергии.

Если сравнить варианты реализации данной технологии на основе использования реактора ВВЭР-1200, то можно сказать, что с термодинамической, экологической и экономической точек зрения очевидно, что создание АЭС с огневым перегревом пара (без дополнительной компрессии) является приоритетным решением.

Коренное достоинство рассмотренного комплекса – ЯППУ-ТЭС – его реализуемость в короткий период времени со значительным снижением углеродного следа в единице произведенной энергии, что является важным условием устойчивого роста энергетического производства при сохранении экологического равновесия в геосфере.

Список литературы

1. Головной блок нового поколения - особенности проекта ВВЭР-1200 / В. Г. Асмолов, И. Н. Гусев, В. Р. Казанский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 5-21.
2. Пономарев-Степной, Н. Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР / Н. Н. Пономарев-Степной // Атомная энергия. 2016. Т. 120. № 4. С. 183-190.
3. Адамов, Е. О. Ядерная энергетика - вызовы и решение проблем / Е. О. Адамов, Д. С. Соловьев // Энергетическая политика. 2017. № 3. С. 21-30.
4. Велихов, Е. П. Заметки о будущем ядерной энергетики / Е. П. Велихов, В. Д. Давиденко, В. Ф. Цибульский // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2019. Т. 42. № 1. С. 5-14.
5. Щепетина, Т. Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) / Т. Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. 2010. № 12. С. 21-29.
6. Тепловые схемы ТЭС и АЭС/В. М. Боровков, О. И. Демидов, С. А. Казаров и др.; Под ред. С. А. Казарова. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение. 1995. 392 с.
7. Репозиторий java-библиотеки TCSimulation [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://github.com/ZharovVV/tcsimulation>. (15.01.2020)
8. Лафоре Р. Структуры данных и алгоритмы в Java. Классика Computer Science. 2-е изд. СПб.: Питер. 2017. 704 с.: ил. (Серия «Классика computer science»).
9. Годовой отчет по результатам работы за 2013 год. ОАО «ИНТЕР РАО-Электрогенерация»
10. Kostarev V. S., Shirmanov I. A., Anikin A. A., Shcheklein S. E. On the possibility of obtaining ultra-supercritical steam parameters at Nuclear Power Plants with fast neutron reactors using non-nuclear steam superheating. 2021 *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1089 012005
11. О применении компрессии и неядерного перегрева пара на реакторах на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем для повышения термодинамической эффективности цикла турбоустановки / И. А. Ширманов, В. С. Костарев, Д. Н. Литвинов, С. Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2021. – Т. 64. – № 2-2(759). С. 171-177.

Сведения об авторе:

Щеклеин Сергей Евгеньевич, заведующий кафедрой «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, доктор технических наук, профессор, s.e.shcheklein@urfu.ru

THE ROLE OF NUCLEAR ENERGY IN EXPANDING THE FUEL AND ENERGY BASE AND THE CLIMATE PRESERVING

S. E. Shcheklein

*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Yekaterinburg, Russia*

The article provides an estimated substantiation of the concept of expanding the fuel and energy base and reducing the volume of greenhouse gas emissions with the joint use of fossil and nuclear fuel in the hybrid nuclear-thermal power plants. It is shown that the technological scheme (the production of saturated steam in a nuclear steam-producing plant - NPPU, and then overheating to the maximum achieved parameters in the thermal power industry applying the fossil fuel) leads to a decrease in the specific consumption of gas fuel for the production of electrical energy by 25-30%, emissions of combustion products by 2.5 times (compared to thermal power plants), consumption of industrial water (compared to nuclear power plants) - by 1.5 times. It is indicated that it is possible to expand the fuel base of modern nuclear energy with thermal neutron reactors through the use of technologies mastered (breeder reactors) and promising (hybrid thermonuclear reactors). The fundamental advantage of the considered JPPP-TPP complex is feasibility in a short period of time with a significant reduction in the carbon footprint per unit of energy produced, which is an important condition for the sustainable growth of energy production while maintaining the ecological balance in the geosphere.

Key words: organic fuel, nuclear fuel, overheating, combustion products, ecology, breeder, hybrid thermonuclear reactors.

References

1. Asmolov V.G., Gusev I.N., Kazanskij V.R., Povarov V.P., Stacura D.B. New generation first of the kind unit – VVER 1200 design features. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika*. 2017. № 3. P. 5-21. (In Russian).
2. Ponomarev-Stepnoi N.N. Two-Component Nuclear Power System with a Closed Nuclear Fuel Cycle Based on BN and VVER Reactors. *At Energy* 120, P. 233–239 (2016).
3. Adamov E.O., Solov'ev D.S. Nuclear power industry: challenges and problem solution. *Energeticheskaya politika*. 2017. № 3. P. 21-30. (In Russian).
4. Velihov E.P., Davidenko V.D., Cibul'skij V.F. Some thoughts on nuclear energy future. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyj sintez*. 2019. T. 42. № 1. P. 5-14. (In Russian).

5. Shchepetina T. D. On improving the efficiency of power units with water-water reactors (VVER). *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2010. №12. P. 21-29. (In Russian).
6. *Тепловые схемы ТЭС и АЭС*. V. M. Borovkov, O. I. Demidov, S. A. Kazarov i dr.; Pod red. S. A. Kazarova. - SPb.: Energoatomizdat. Sankt-Peterburgskoe otdelenie. 1995. P. 392. (In Russian).
7. TCP Simulation java library repository [Electronic resource]. Access mode: URL: <https://github.com/ZharovVV/tcsimulation>. (15.01.2020)
8. Lafore R. *Data Structures and Algorithms in Java*. Classika Computer Science. 2nd edition. – SPb.: Piter. 2017. 704 p. (In Russian).
9. Annual report on the results of work for 2013. OJSC INTER RAO-Electrogeneratsiya (Godovoj otchet po rezul'tatam raboty za 2013 god. OAO «INTER RAO-Elektrogeneraciya») (In Russian).
10. Kostarev V.S., Shirmanov I.A., Anikin A.A., Shcheklein S.E. On the possibility of obtaining ultra-supercritical steam parameters at Nuclear Power Plants with fast neutron reactors using non-nuclear steam superheating. 2021 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 1089 012005
11. Shirmanov I.A., Kostarev V.S., Litvinov D.N., Shcheklein S.E. O primenenii kompressii i neyadernogo peregreva para dlya reaktorov na bystryh nejtronah so svincovym teplonositelem dlya povysheniya termodinamicheskoy effektivnosti cikla turboustanovki. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Fizika*. 2021. T. 64. № S2-2 (759). P. 171-177.