УДК 621.039

DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.01

Оригинальная статья / Original paper

Первенец коммерческой атомной энергетики и ориентир для энергетики будущего

А.В. Шутиков[1], И.И. Сидоров[2], Ю.В. Носов[2], С.Е. Щеклеин[3]

[1] *АО «Концерн Росэнергоатом», 115191 Россия, Москва, Холодильный пер., 3а*

[2] *Белоярская АЭС, 624250 Россия, г. Заречный, Свердловская обл., а/я 149*

[3] *Уральский федеральный университет, 620062 Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19*

Реферат. Производство и потребление электрической энергии и топлив для энергетики и транспорта в XXI в. требуют все больших объемов ископаемых природных энергоносителей – угля, газа, нефти и урана. Только органических топлив потребляется в настоящее время более 20 млрд. тонн условного топлива ежегодно. Такие масштабы извлечения и использования энергоносителей при современном технологическом уровне их использования (термодинамические циклы Ренкина, Брайтона, Отто и Дизеля) приводят к изменению температурного режима планеты вследствие прямого сброса в геосферу огромных потоков тепловой энергии низкого потенциала, а также эмиссии в атмосферу трехатомных газов, нарушающих радиационный теплообмен поверхности планеты и окружающего космического пространства, т. е. создающих парниковый эффект. Имеется необходимость снижения негативных климатических последствий, связанных с производством электрической энергии с применением уже полностью освоенных технологий атомной и тепловой энергетики. Делается попытка преодоления современных температурных ограничений АЭС с легководными реакторами с использованием опыта эксплуатации энергоблоков АМБ-100 и АМБ-200 первой очереди Белоярской АЭС. Рассматривался вариант ядерной паропроизводящей установки (ЯППУ) АЭС, включающей в себя реактор, парогенератор и другое оборудование первого контура, генерирующей насыщенный пар, который далее поступает в котел-пароперегреватель, обогреваемый органическим топливом. Способ повышения КПД АЭС путем ядерного перегрева пара был реализован на кипящих реакторах канального типа АМБ (Россия) и корпусного типа «Гроссвальцгейм» (ФРГ), но не получил дальнейшего развития, главным образом, из-за необходимости применять в активной зоне реактора жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы, снижающие эффективность использования уранового топлива в реакторах на тепловых нейтронах. Применение неядерного огневого перегрева пара в 60 – 70-х годах 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

© *Шутиков А.В., Сидоров И.И., Носов Ю.В., Щеклеин С.Е., 2025*

генерируемого пара. 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. Авторами выполнен анализ эффективности экологического воздействия гибридной атомно-тепловой электростанции на базе ЯППУ Российского проекта АЭС с реактором ВВЭР-1200. Показано, что 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 воспол-нения ядерного топлива путем использования реакторов типа БН, а в дальнейшем быстрых реакторов со свинцовым теплоносителем (БРС) и термоядерных реакторов (ТЯР). Рассмотренные варианты реализации термодинамических циклов подобных электростанций показывают их высокую энергетическую и экологическую эф-фективность. 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 парниковых газов и других продуктов сгорания, а также меньшей величиной топливной составляющей себестоимости энергии.

Ключевые слова: неядерный перегрев пара, экология, парниковый эффект, эко-номичность, безопасность, надежность, энергоэффективность.

Для цитирования: Шутиков А.В., Сидоров И.И., Носов Ю.В., Щеклеин С.Е. Первенец коммерческой атомной энергетики и ориентир для энергетики будущего. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;3:8–27. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.01

Введение

3 сентября 1963 г. был произведен физический пуск первого в СССР коммерческого энергетического уран-графитового ядерного реактора АМБ-100, а в конце апреля 1964 г. энергоблок с этим аппаратом начал выдавать электрическую энергию в энергосистему страны. Реактор на слабообогащенном уране конструкции НИКИЭТ при научном руководстве ФЭИ позволял производить теплосъем от активной зоны кипящей водой и перегретым паром. Реализация этого проекта позволила осуществить получение пара высоких параметров, высокий КПД установки и возможность исполь-зования стандартного энергетического оборудования. Успешная реализация этого проекта открыла эру мирного использования атомной энергии для удовлетворения энергетических потребностей человечества.

Производство и потребление электрической энергии и топлив для энергетики и транспорта в XXI в. требуют все больших объемов ископаемых природных энер-гоносителей – угля, газа, нефти и урана. Только органических топлив потребляется в настоящее время более 20-ти млрд. тонн условного топлива ежегодно [1]. Несмотря на развитие новых возобновляемых источников энергии доля традиционных техно-логий в структуре энергетики превышает 90%, а в транспорте – 99,9% [2, 3].

Органические топлива и уран накапливались в литосфере Земли в течение сотен миллионов лет благодаря естественным процессам ассоциации атомов химических элементов и разложения продуктов развития биосферы. На рисунке 1 показан характерный график формирования и потребления природных энергоносителей, показывающий, что современная скорость потребления энергоресурсов превышает

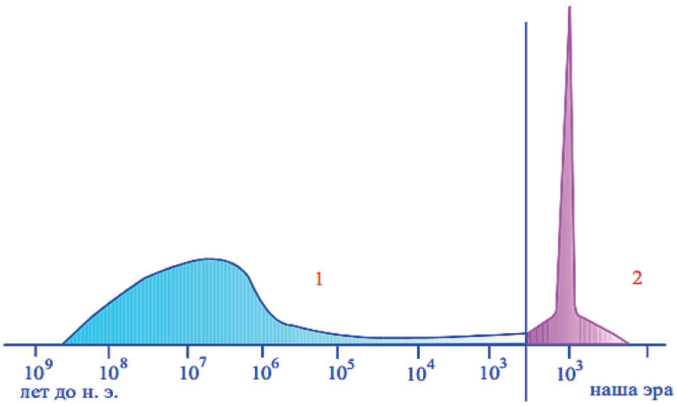

Рис. 1. Процессы образования в природе и расходования человеком запасов органического топлива: 1 – процесс образования (500 млн. до н. э. – 10 млн.л. до н.э.); 2 – процесс использования человеком топлива (1800 – 2300 гг.)

скорость их образования – то, что природа создавала 500 млн. лет, мы сжигаем за 500 лет, т.е. в миллион раз быстрее [4].

Парниковый эффект

В настоящее время ежегодные объемы энергии, поступающие в геосферу от использования всех ископаемых топлив (уголь, нефть, природный газ, уран и пр.) и составляющие 160 ТВт·ч, еще существенно меньше энергии, поступающей от Солнца на поверхность Земли – 700000 ТВт·ч [5, 6]. Однако уже встает задача их максимального снижения.

Сложившиеся масштабы извлечения и использования энергоносителей при современном технологическом уровне их использования (термодинамические циклы Ренкина, Брайтона, Отто и Дизеля) приводят к изменению температурного режима планеты вследствие прямого сброса в геосферу огромных потоков тепловой энергии низкого потенциала, а также эмиссии в атмосферу трехатомных газов, нарушающих радиационный теплообмен поверхности планеты и окружающего космического пространства, т.е. создающих парниковый эффект.

Процесс получения электрической и тепловой энергии из органических топлив базируется на окислении углерода и химически связанного водорода в органических топливах с образованием значительных количеств двуокиси углерода CO_2, паров воды H_2O и окислов азота NO_X в газообразном состоянии [7 – 11].

В обобщенном виде стехиометрические уравнения реакций окисления углеводородных топлив и спиртов воздухом выражается формулами

$$C_mH_n + (m + n/4)\,(O_2 + 3{,}76\,N_2) = mCO_2 + n/2\,H_2O + 3{,}76\,(m + n/4)\,N_2$$

$$C_mH_{2m+1}OH + 1{,}5m(O_2 + 3{,}76\,N_2) = mCO_2 + (m+1)H_2O + 3{,}76(1{,}5m)N_2.$$

Выполненные в последние десятилетия исследования показывают, что все образующиеся газовые продукты сгорания создают или способствуют усилению парникового эффекта. Принимая за эталон коэффициент радиационного теплообмена для CO_2, можно выразить степень опасности этих газов в виде парникового «эквивалента CO_2». Данные такого анализа приведены в табл. 1 [12].

Таблица 1

Парниковый эквивалент CO_2 для ряда газов [12]

Газ	Парниковый «эквивалент CO_2», т/т CO_2
CO_2	1
Водяной пар	5
Метан	21
NO_2	310

Международное научное сообщество и правительственные организации стран мира, опасаясь серьезных климатических изменений, связанных с повышением температуры планеты вследствие использования ископаемых топлив, провели ряд экологических конференций – Рио де Жанейро (1992 г.), Киото (1997 г.), Париж (2015 г.) и др., где были разработаны политический и экономический механизмы стимулирования защиты климата планеты [13]. Однако в принятых документах признан опасным лишь один газ – углекислый (CO_2).

Реально существуют четыре потока тепловой энергии и парниковых газов, поступающих в геосферу и имеющих практически равное отрицательное влияние на климат [14]:

- прямой сброс теплоты от сгорания топлив в геосферу в существующих технологиях производства и потребления энергии – прямой подогрев геосферы;
- пар воды вследствие испарительного охлаждения паровых конденсаторов тепловых и атомных электростанций (ТЭС и АЭС) – подогрев вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса;
- углекислый газ, образующйся при сжигании углеводородных топлив тепловых электростанций (ТЭС) – подогрев вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса;
- водяной пар, образующийся при сжигании углеводородных топлив ТЭС – подогрев вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса.

Схема образующихся потоков парниковых газов ТЭС и АЭС приведена на рис. 2.

Наибольшее распространение в современной энергетике получили конденсационные электростанции (ТЭС и АЭС) с системами охлаждения конденсаторов паровых турбин с испарительными градирнями и прудами-охладителями. В этих системах конденсация пара и отвод тепла в окружающую среду осуществляется, в основном, за счет эффекта испарения жидкости в объеме градирен или с поверхности прудов охладителей. На рисунке 3 приведены фотографии систем охлаждения типичной конденсационной ЭС с градирней или прудом охладителем [14].

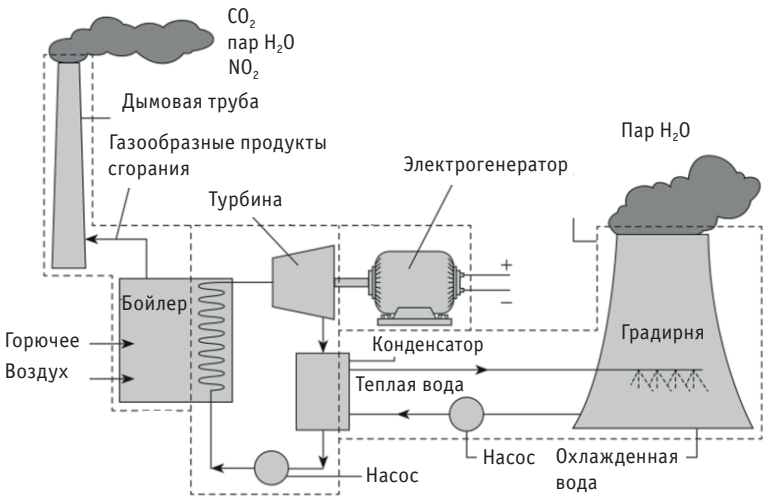

Рис. 2. Потоки эмиссии парниковых газов электростанцией [14]

Градирни

Пруд-охладитель

Рис. 3. Системы охлаждения современных конденсационных электростанций [14]

Методика и результаты расчета образования паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов паровых турбин ТЭС и АЭС

Пусть N_e – электрическая мощность электростанции (ЭС), МВт. Подводимая тепловая мощность

$$Q_1 = N_e/\eta, \text{ МВт},$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД) электростанции. Значения достигнутых уровней КПД для современных технологий производства электрической энергии ТЭС и АЭС различного типа приведены в табл. 2.

Мощность, отводимая в системе охлаждения конденсаторов

$$Q_2 = Q_1 - N_e, \text{ МВт}.$$

Таблица 2

Достигнутые уровни КПД для современных технологий производства электрической энергии [14]

Тип ЭС	КПД, %
АЭС с ВВЭР	35
АЭС с РБН	40
АЭС с ВТГР	50
ТЭС	35 – 45
Комбинированная парогазовая ТЭС (ПГУ)	45 – 50
ТЭС с ультрасверхкритическими параметрами пара (УСКЭС)	55

Испарительное охлаждение конденсаторов

$$G_w = Q_2/r, \text{ кг/с},$$

где r – скрытая теплота парообразования воды 2450, кДж/кг.

Масса испарившейся воды за год

$$M_в = G_w \cdot T_{год}, \text{ кг/год},$$

где $T_{год} = 8000$ час – время работы ТЭС в году.

Производство электрической энергии ТЭС

$$Э_{год} = N_e \cdot T_{год} = 10^6 \cdot 8 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^9, \text{ кВт·ч/год}.$$

Удельный выход воды

$$b = M_в/Э_{год}, \text{ кг/кВт·ч}.$$

Анализ показывает, что наибольшее образование паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов происходит на ТЭС, работающей на мазуте, наименьшее – на ТЭС с ультрасверхкритическими параметрами пара (УСКЭС), АЭС с высокотемпературными ядерными реакторами (ВТГР) и реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем (БР с ЖМТ), а также парогазовых тепловых электростанций (ТЭС с ПГУ).

Методика расчета удельного выхода водяного пара в атмосферу земли при сжигании органических топлив [10, 14]

Электрическая мощность электростанции N_e, МВт.

Подводимая тепловая мощность

$$Q_1 = N_e/\eta, \text{ МВт},$$

где η – коэффициент полезного действия (КПД) ЭС.

Теплота сгорания топлива $Q_н^р$, МДж/кг.
Расход топлива

$$b_т = Q_1/Q_н^р, \text{ кг/с.}$$

Время работы ЭС в году $T_{год} = 8 \cdot 10^3$, час/год.
Годовой расход топлива

$$B_т = b_т \cdot T_{год}, \text{ кг/год.}$$

Годовое производство электрической энергии ЭС

$$Э_{год} = N_e \cdot T_{год}, \text{ кВт·ч/год.}$$

Удельный расход топлива

$$q_1 = B_т/Э_{год}, \text{ кг/кВт·ч.}$$

Удельный выход паров воды при сжигании топлива g, кг/МДж [9].
Энергия топлива

$$E_т = Q_1 \cdot T_{год} \cdot q_1 \cdot Q_н^р, \text{ МДж.}$$

Образование паров воды от сгорания топлива

$$G_{пар} = E_т \cdot g, \text{ кг/год.}$$

Удельный выход паров воды

$$G = G_{пар}/Э_{год}.$$

Результаты расчетов по данной методике для различных типов ТЭС и АЭС приведены на рис. 4 [14].

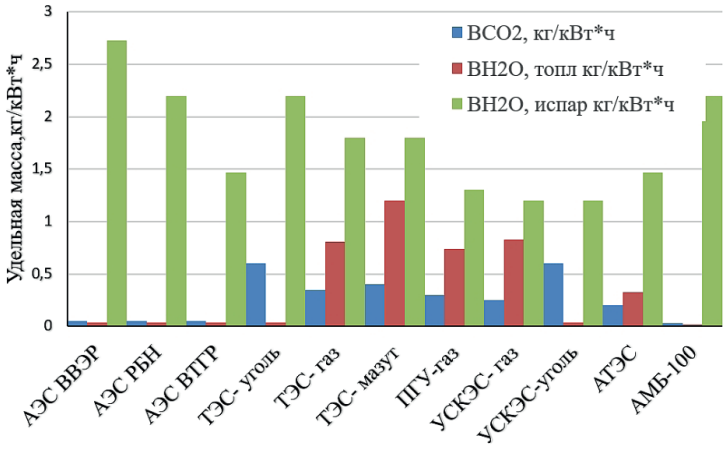

Рис. 4. Удельные массы образования CO_2 и паров воды [14]

Анализ показывает, что наибольшее образование паров воды при сжигании топлива происходит на ТЭС, работающих на природном газе. Наименьшее – на ТЭС с ультрасверхкритическими параметрами пара (УСКЭС), работающих на угле; АЭС всех типов, а также комбинированных атомно-тепловых электростанциях (АТЭС).

Общий выход паров воды и CO_2 от электростанций разных типов

На рисунке 4 приведены данные по удельному образованию CO_2 и паров воды при выработке электрической энергии электростанциями разных типов.

Суммарное влияние на парниковый эффект паров воды и диоксида углерода, поступающих в атмосферу по всем каналам возможного образования при выработке электрической энергии, может быть оценено по следующему соотношению [14]:

$$П_{сум} = K_{CO2} \cdot b_{CO2} + K_{H2O} \cdot (b_{топл} + b_{исп}),\ экв.CO_2/\ кВт \cdot ч,$$

где K_{CO2} = 1 экв.CO_2 / кВт·ч, K_{H2O} = 5 экв.CO_2 / кВт·ч (см. табл. 1), b_{CO2} – удельный выход диоксида углерода при сгорании топлива, кг/кВт·ч, $b_{топл}$ – удельный выход паров воды при сгорании топлива, кг/кВт·ч, $b_{исп}$ – удельный выход паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов ЭС, кг/кВт·ч.

На рисунке 5 приведены данные расчетов суммарного влияния на парниковый эффект паров воды и диоксида углерода (в виде эквивалента CO_2) для ТЭС и АЭС разных типов.

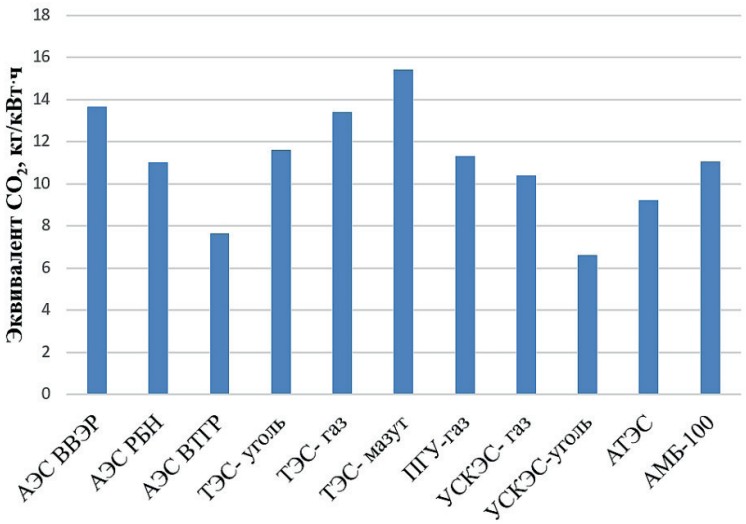

Рис. 5. Общий коэффициент воздействия на геосферу (в виде эквивалента CO_2) разных типов ТЭС и АЭС [14]

Анализ рис. 5 показывает, что самое малое воздействия на геосферу оказывают АЭС с ВТГР и ТЭС с ультрасверхкритическими параметрами генерируемого острого пара; наиболее сильное воздействие – ТЭС и транспортные ДВС на жидком углеводородном топливе. ТЭС, использующие угольное топливо (не имеющего в своем составе водорода), эмитируют при сгорании меньшее количество водяного пара и сохраняют по условиям

парникового эффекта конкурентоспособность с современными АЭС с реакторами на тепловых нейтронах. Большие перспективы имеют ТЭС с ультрасверхкритическими параметрами генерируемого острого пара, работающими на угольном топливе и АЭС типа БН и ВТГР. Предотвращение выхода паров воды в атмосферу также возможно путем применения сухих градирен [15 – 19].

Использование опыта Белоярской АЭС в преодолении парникового эффекта и климатических изменений

Рассматривается возможность снижения негативных климатических последствий, связанных с производством электрической энергии с применением уже полностью освоенных технологий атомной и тепловой энергетики. Делается попытка преодоления современных температурных ограничений АЭС с легководными реакторами [20] с использованием опыта эксплуатации энергоблоков АМБ-100 и АМБ-200 первой очереди Белоярской АЭС.

Ядерная паропроизводящая установка (ЯППУ) АЭС, включающая в себя реактор, парогенератор и др. оборудование первого контура, генерирует насыщенный пар, который далее поступает в огневой котел-пароперегреватель, обогреваемый органическим топливом. Способы повышения КПД цикла путем ядерного 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 в активной зоне реактора жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы, снижающие эффективность использования уранового топлива в реакторах на тепловых нейтронах. Применение неядерного огневого перегрева пара в 60–70-х годах 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 [21].

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 [22, 23].

При помощи пакета UnitedCycle [24], 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.

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 огневой перегрев пара до уровня ультра-сверхкритических параметров, достигнутых в современной тепловой энергетике (30 МПа, 650°С) с двумя ступенями промежуточного перегрева.

Термодинамические диаграммы данных циклов приведены на рис. 6 [22].

Результаты расчетов приведены в табл. 3.

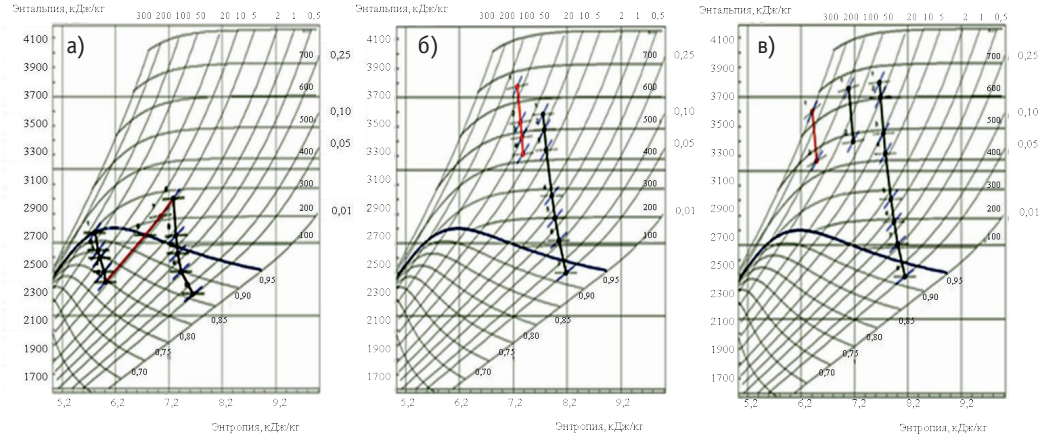

Рис. 6. *h-s*-диаграммы вариантов АЭС и АТЭС [22]: а) – проектный цикл К-1200-6,8/50 для АЭС с реактором ВВЭР-1200; б) – цикл с начальным перегревом + 1 ст. промперегрева; в) – цикл с компрессией и перегревом + 2 ст. промперегрева

Таблица 3

Интегральные характеристики результатов расчета [22]

Параметр	Значения		
Тип электростанции	АЭС ВВЭР-1200	АТЭС с ЯППУ и начальным перегревом пара	АТЭС с ЯППУ начальной компрессией и перегревом пара
Расход насыщенного пара, кг/с	1794,86	1794,86	1794,86
Тепловая мощность, подводимая к рабочему телу в ПГ, МВт	3210,34	3242,91	3240,75
Суммарная тепловая мощность котла, МВт	0	2255,44	2375,10
Расход газа в котле, м^3/с	0	65,26	68,72
Мощность компрессора, МВт	0	0	717,86
Электрическая мощность ПТУ (брутто), МВт	1162,52	2359,35	2476,65
Электрическая мощность ПТУ (нетто), МВт	1140,97	2336,54	2453,72
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

На рисунке 7 приведены характеристики базового (ВВЭР-1200) и модифицированных (гибридных) 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.

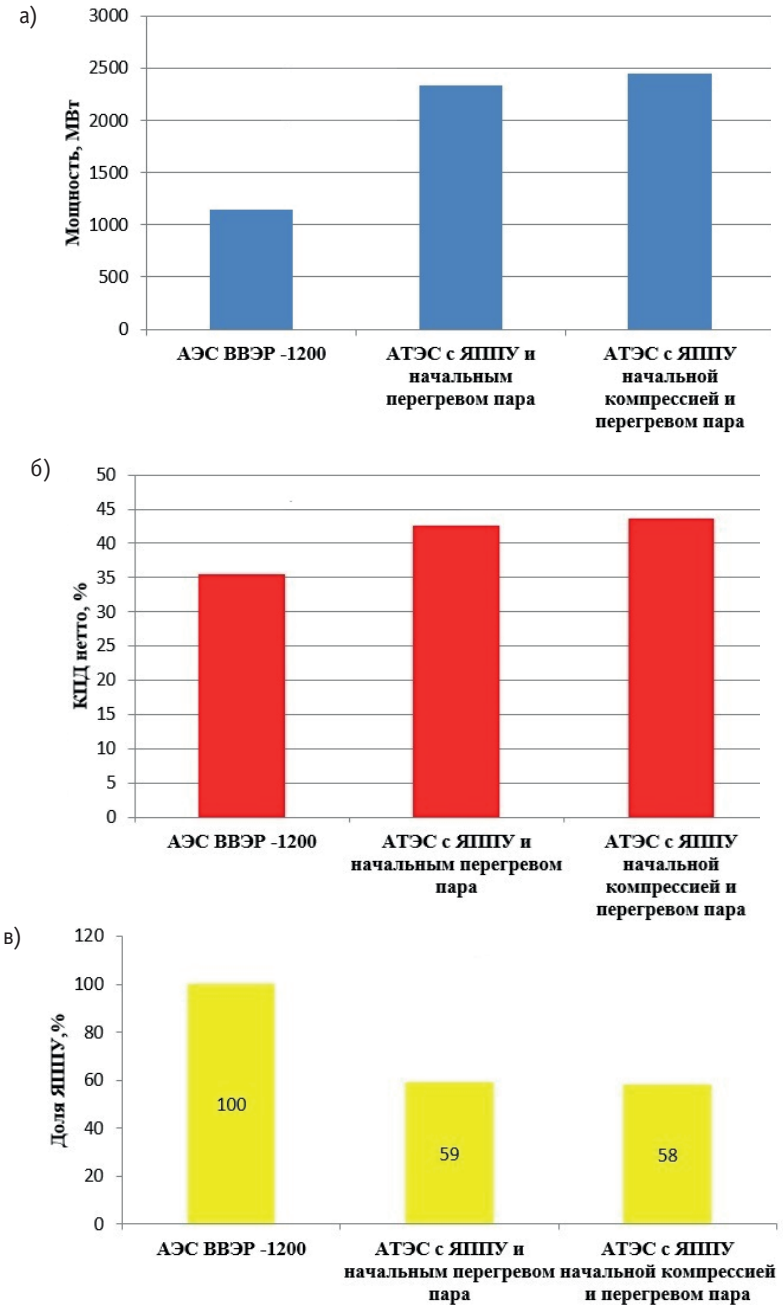

Рис. 7. Сравнительные характеристики базового и модифицированных вариантов [23]: а) – мощность; б) – КПД; в) – доля ЯППУ

Для сравнения приведем характеристики Пермской ГРЭС, 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 4

Годовой отчет за 2013 г. Пермская ГРЭС [25]

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

На рисунке 8 приведены сравнительные характеристики ТЭС, АЭС и АТЭС по углеродоемкости.

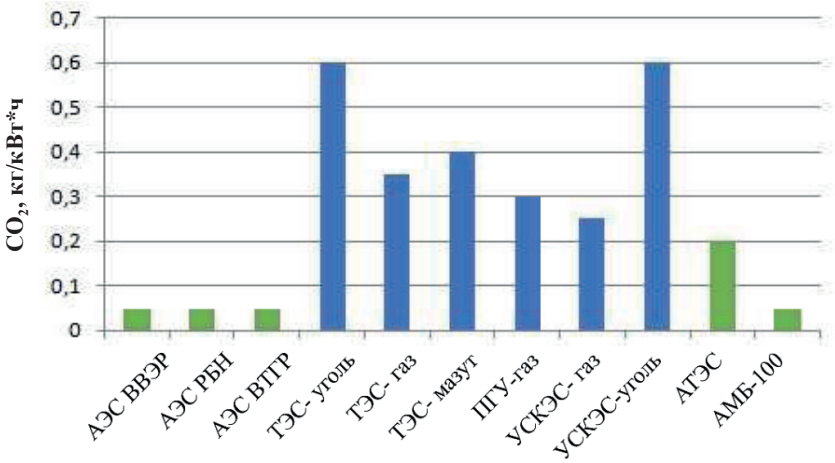

Рис. 8. Удельная эмиссия CO_2 в зависимости от типа электростанции

Повышение параметров пара и снижение расхода органического топлива на единицу произведенной энергии приводят к снижению выхода продуктов сгорания, в том числе CO_2, представляющего опасность повышения парникового эффекта, что радикально увеличивает экологические параметры использования органического топлива на АТЭС.

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 (реакторы на быстрых нейтронах с натриевым, свинцовым и свинцово- висмутовым теплоносителями – БН, БРС, СВБР, ВТГР) [26, 27].

В то же время дополнительный учет парникового эффекта, создаваемого парами воды, поступающими в атмосферу, для любых конденсационных электростанций

дает несколько иное распределение климатически значимых газов по типам электростанций (рис. 9).

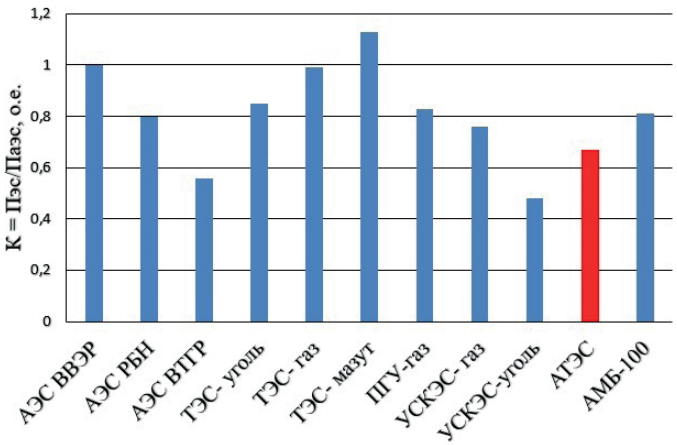

Рис. 9. Относительная эмиссия парниковых газов с учетом CO_2 и паров воды по отношению к ВВЭР

Из графика видно, что низкие начальные параметры пара современных АЭС, обеспечивающие низкий коэффициент преобразования тепловой энергии в электрическую, приводят к необходимости отвода большого количества тепловой энергии в геосферу в виде водяного пара. В этом случае лидерами экологически безопасной энергетики явятся АЭС типа ВТГР, БН и другие типы АЭС в комбинации с огневым перегревом пара.

Структура энергетики XXI в.

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

- недостаточность топливно-энергетических ресурсов даже на ближайшие десятилетия для обеспечения все возрастающих потребностей в энергии;
- аномально высокий и все возрастающий уровень воздействия энергетики и транспорта на атмосферу, гидросферу и биосферу, приводящие 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 (рис. 10) [22].

Для решения этих проблем следует сосредоточить усилия на ускоренном развитии атомной энергетики:

- создание и доведение до высокого уровня надежности и эффективности водоохлаждаемых паропроизводящих установок типа ВВЭР (PWR) и АЭС на их основе [28];

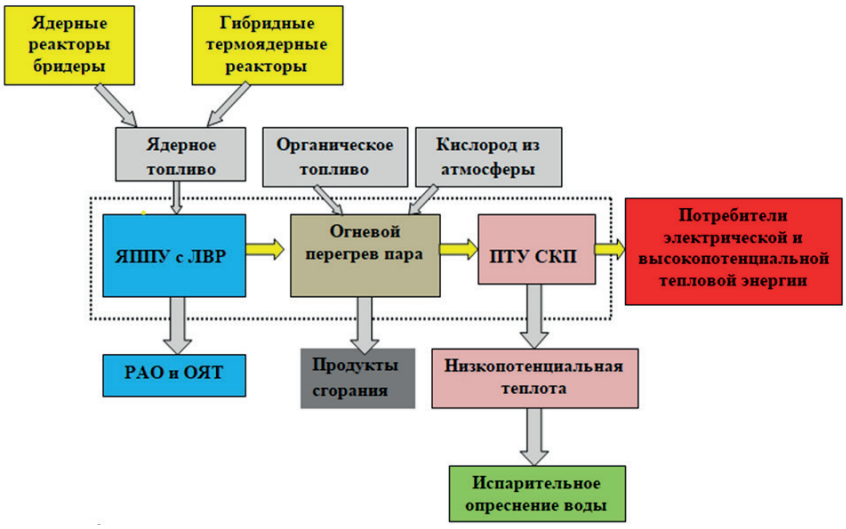

Рис. 10. Схема энергетической системы гибридного типа [22]

• создание и скорейшая валидация АЭС с реакторами на быстрых нейтронах типа БН, способных в ближайшей перспективе обеспечить расширенное воспроизводство плутония (вовлечение в топливный цикл атомной энергетики урана-238 и ОЯТ реакторов ВВЭР), что определит условия для замыкания ядерного топливного цикла и многократно расширит топливную базу атомной энергетики для всех типов реакторов [29];

• решение основных теоретических проблем создания нового поколения реакторов на быстрых нейтронах с более высокой степенью воспроизводства [30];

• развитие успехов в создании установок управляемого термоядерного синтеза – источника нейтронов для нереакторного воспроизводства, что открывает возможность наработки плутония-239 для существующих АЭС всех типов (ВВЭР, БН, БРС и др.) [31];

• разработка комбинированного использования преимуществ АЭС и ТЭС (создание АТЭС) с минимальным негативным воздействием на геосферу [22, 32].

Заключение

Опыт успешной эксплуатации первой очереди Белоярской АЭС с реакторами АМБ показал эффективность перегрева насыщенного пара для повышения термодинамической и экологической эффективности АЭС и указал путь перспективного развития.

Современный уровень развития крупномасштабных электрических 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 на быстрых нейтронах типа БН; освоением в тепловой энергетике ТЭС, работающих на закритических и ультра-сверхкритических параметрах пара (недоступных для современных АЭС).

Быстрый путь радикального снижения экологических нагрузок от энергетических объектов в обозримой перспективе – 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 типа БН, а в дальнейшем БРС и ТЯР. Рассмотренные варианты реализации термодинамических циклов подобных электростанций показывают их высокую энергетическую и экологическую эффективность.

Электростанции, реализующие такие циклы, – это пример сочетания достоинств АЭС и ТЭС. По сравнению с «обычной» АЭС они обладают более высокими мощностями и 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 АТЭС и обычные АЭС и ТЭС, то можно сказать, что с термодинамической, экологической и экономической точек зрения повышение параметров пара путем его неядерного перегрева, а в перспективе достижение ультрасверхкритических параметров пара на АЭС с ВВЭР-1200 приводит к значительному увеличению мощности и КПД, снижению негативных ресурсных и экологических последствий развития энергетики.

Литература

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019. Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. Москва: ИНЭИ РАН–Московская школа управления СКОЛКОВО, 2019, 210 с. ISBN 978-5-91438-028-8.

2. Смил В. Энергия и цивилизация от первобытности до наших дней. Пер. с англ. Д.Л. Казакова. Москва: Бомбора, 2020, 478 с. – ISBN 978-5-04-101573-2.

3. BP Statistical Review of World Energy 2020. URL: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf (дата обращения 16.06.2025).

4. Щеклеин С.Е. Человек – энергия – природа. Екатеринбург: УГТУ, 1998, 58 с.

5. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008, 320 с. ISBN 978-5-383-00270-4.

6. Davies J.H., Davies D.R. Earth's surface heat flux. *Solid Earth*. 2010;1:5–24. DOI: https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010

7. Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):1151–1157. URL: https://www.researchgate.net/publication/332373857_Analysis_of_Nitrogen_Oxides_Emission_by_Modern_Vehicles_when_Used_Hydrogen_or_Other_Natural_and_Synthetic_Fuels_in_Combustion_Chamber (дата обращения 15.06.2025).

8. Shcheklein S.E., Dubinin A.M., Alwan N.T. Obtaining fresh water from natural and synthetic fuels in the energy sector. *International Journal of Energy Production and Management*. 2021;6(2):193–201. DOI: https://doi.org/10.2495/EQ-V6-N2-193-201

9. Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural and synthetic fuels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;177(1):012020. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/177/1/012020 (дата обращения 15.06.25).

10. Щеклеин С.Е., Дубинин А.М., Гусев А.Л. О эмиссии водяного пара в атмосферу объектами энергетики. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE)*. 2024;11:101–109. URL: https://www.isjaee.com/jour/article/view/2577 (дата обращения 15.06.25).

11. Schmidt G.A., Ruedi R.A., Miller R.L., Latsis A.A. Determination of the general greenhouse effect to date. *Journal of geophysical research*. 2010;115:D20106. DOI: https://doi.org/10.1029/2010JD014287

12. Данилов-Данилян В. И., Лосев К. С. Экологический вызов и устойчивое развитие. М.: Прогресс-Традиция, 2000, 415 с.

13. Бердин В.Х., Грицевич И.Г., Кокорин А.О., Федоров Ю.Н. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: справочное пособие. М.: WWF России, 2004, 137 с.

14. Щеклеин С.Е., Дубинин А.М. К проблеме эмиссии парниковых газов объектами электроэнергетики. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2024;149(11):120. URL: https://research-journal.org/archive/11-149-2024-november/10.60797/IRJ.2024.149.104 (дата обращения 15.06.25).

15. Кузнецов В.М. Сухие градирни против парникового эффекта. URL: http://www.ng.ru/energy/2008-04-08/22_gradirni.html (дата обращения 01.06.2025).

16. Болдырев В.М. Похоже, альтернатив для сухих градирен нет. *РЭА (Росэнергоатом)*. 2008;6.

17. Лим К.В., Синяков А.А., Ташлыков О.Л. О проблеме снижения выбросов водяных паров, как парниковых газов, при работе ТЭС и АЭС. В сб. Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Екатеринбург, 2015, с. 314–316.

18. Рончинский А.Б. АЭС с непосредственным отводом тепла конечному поглотителю. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Сб. докладов VIII Междунар. науч.-техн. конф. 23–25 мая 2012 г. М.: ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012, с. 632–635.

19. Полтараков Г.И. Дилемма: градирни «мокрые» или «сухие». URL: http://proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3823 (дата обращения 01.06.25).

20. Щепетина Т.Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР). *Энергия: экономика, техника, экология*. 2010;12:21–29. EDN: NBKSAH.

21. Zaryankin A.E., Zroichikov N.A., Arianov S.V., Rogalev A.N. Turbine of nuclear power plant with outer steam superheater. Proc. of the VI Conf. on Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Flow. Pilsen, Czech Republic, 2007.

22. Щеклеин С.Е. Роль ядерной энергии в расширении топливно-энергетической базы и сохранении климата. Траектория исследований – человек, природа, технологии. 2022;1(1): 5–15. URL: https://restrajectory.ru/2Shcheklein%205-15.pdf (дата обращения 15.06.25).

23. Щеклеин С.Е. Союз ТЭС и АЭС. Атомэксперт. 2021;1–2. URL: https://www.atomicexpert.com/union_of_tpp_and_npp (дата обращения 08.07.2025).

24. Romanov S.N., Kutakhov A.G., Romanov K.S. Software united cycle for simulation of static operation modes of power plants. Proc. of SPIE – International Society for Optical Engineering. 2002, vol. 4627, p. 306–309. DOI: https://doi.org/10.1117/12.456288

25. ОАО «ИНТЕР РАО – Электрогенерация». Годовой отчет по результатам работы за 2013 год. URL: https://irao-generation.ru/upload/docs/eg_godovoy_otchet_2013.pdf (дата обращения 21.06.2025).

26. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1089(1):012005. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/1089/1/012005

27. Ширманов И.А., Костарев В.С., Литвинов Д.Н., Щеклеин С.Е. О применении компрессии и неядерного перегрева пара для реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем для повышения термодинамической эффективности цикла турбоустановки. *Известия вузов. Физика*. 2021;64(2-2):171–177. DOI: https://doi.org/10.17223/00213411/64/2-2/171

28. Асмолов В.Г., Гусев И.Н., Казанский В.Р., Поваров В.П., Стацура Д.Б. Головной блок нового поколения – особенности проекта ВВЭР-1200. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2017;3:5–21. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01

29. Пономарев-Степной Н.Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР. *Атомная энергия*. 2016:120(4):183–190. URL: https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t120-4_2016/p183/ (дата обращения 15.06.25).

30. Адамов Е.О., Соловьев Д.С. Ядерная энергетика – вызовы и решение проблем. *Энергетическая политика*. 2017;3:21–30. EDN: ZREKOT

31. Велихов Е.П., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Заметки о будущем ядерной энергетики. *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез*. 2019;42(1):5–14. DOI: https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-5-14

32. Щеклеин С.Е. Роль энергетики в преодолении климатических угроз. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2021;9:18–30. DOI: https://doi.org/10.7868/S0233361921090044

Поступила в редакцию 10.07.2025
После доработки 11.08.2025
Принята к опубликованию 20.08.2025

Авторы

Шутиков Александр Викторович, генеральный директор АО «Концерн Росэнергоатом», к.т.н.
E-mail: info@rosenergoatom.ru
Сидоров Иван Иванович, директор Белоярской АЭС,
E-mail: info@rosenergoatom.ru
Носов Юрий Валентинович, главный инженер Белоярской АЭС,
E-mail: info@belnpp.ru
Щеклеин Сергей Евгеньевич, зав. кафедрой «Атомные станции и ВИЭ», д.т.н.
E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

UDC 621.039

The Firstling of Commercial Nuclear Power and a Landmark for the Power of the Future

Shutikov A.V.[1], Sidorov I.I.[2], Nosov Yu.V.[2], Shcheklein S.E.[3]

[1] *JSC Rosenergoatom Concern,*
3a, Kholodil'nyy Per., 115191 Moscow, Russia

[2] *Beloyarsk NPP,*
Post office box 149, 624250 Zarechny, Sverdlovsk reg., Russia

[3] *Ural Federal University,*
19 Mira St., 620062 Yekaterinburg, Russia

Abstract

The production and consumption of electric energy and fuels for transport in the 21st century require increasing consumption of fossil natural energy sources – coal, gas, oil and uranium. Currently, more than 20 billion tons per year are consumed by organic fuels alone. This scale of extraction and use of energy resources at the modern technological manner (the thermodynamic cycles of Rankine, Brighton, Otto and Diesel) leads to a change in the temperature regime of the planet due to the direct discharge into the geosphere of huge flows of low-potential thermal power, as well as the emission into the atmosphere of 3 atomic gases disrupts the radiative heat balance of the planet's surface and the surrounding space.

This paper considers the possibility of reducing the negative climatic consequences associated with the production of electric power using fully mastered nuclear and thermal power technologies. To rise the actual temperature limits for LVR nuclear power plants the operational experience of the AMB 100 and AMB 200 power units is considered.
A nuclear power plant includes reactor, steam generator and other equipment of the 1st circuit, produces saturated steam, which is overheated with organic fuel.
Nuclear overheating is used in boiling reactors of the AMB channel type (Russia) and Grosswalzheim vessel type (Germany), but did not receive further development, mainly due to the need to use high-temperature steels in the reactor core, which reduce the efficiency of using uranium fuel in thermal neutron reactors.
Non-nuclear fire superheating of steam in the 60-70s has been implemented at the nuclear power plants Indian Point-1, Elk River (USA), Lingen (Germany). It was a necessary measure to prevent the high humidity of steam in the turbines, which causes problems in their operation due to the low initial parameters of the generated steam. The level of thermodynamic steam parameters of actual design nuclear power plants is significantly higher, as are the environmental requirements for modern thermal power plants. In this regard, there is an interest in analyzing the possibilities of synergetic use of thermal power plants and nuclear power plants.
An analysis of the effectiveness for the environmental impact of a hybrid nuclear thermal power plant based on a VVER-1200 is carried out in this paper. It is shown that the approach to radically reduce environmental impact by power facilities in the foreseeable future is to create hybrid energy based on the mastered VVER and non-nuclear «fire» steam overheating technologies to achieve the parameters of modern thermal power plants and to compensate nuclear fuel consumption by using BN type reactors, and later BRS and TNR. Compared with «conventional» nuclear power plants, this technology has higher efficiency, lower specific capital investment, and lower fuel consumption, lower emissions of greenhouse gases and other combustion products, as well as a lower fuel component of energy costs, compared with «conventional» thermal power plants.

Keywords: non-nuclear steam overheating, ecology, greenhouse effect, efficiency, safety, reliability, energy efficiency.

For citation: Shutikov A.V., Sidorov I.I., Nosov Yu.V., Shcheklein S.E. The Firstling of Commercial Nuclear Power and a Landmark for the Power of the Future. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;3:8–27. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2025.3.01 (in Russian).

References

1. Forecast of the development of energy in the world and Russia 2019. Edited by A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagina. Moscow. INEI RAN–Moskovskaya shkola upravleniya SKOLKOVO, 2019, 210 p. ISBN 978-5-91438-028-8 (in Russian).

2. Smil V. Energy and civilization from primitive times to the present day. Moscow. Bombora, 2020, 478 p. ISBN 978-5-04-101573-2 (in Russian).

3. BP Statistical Review of World Energy 2020. URL: https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statisticalreview/bp-stats-review-2020-full-report.pdf (assessed June 16, 2025).

4. Shcheklein S.E. Man – energy – nature. Yekaterinburg. UGTU, 1998, 58 p. (in Russian).

5. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K. Solar Energy: A Textbook for Universities. Moscow. Izdatel'skij dom MEI, 2008, 320 p. ISBN 978-5-383-00270-4 (in Russian).

6. Davies J.H., Davies D.R. Earth's surface heat flux. *Solid Earth*. 2010;1:5–24. DOI: https://doi.org/10.5194/se-1-5-2010

7. Shcheklein S. E., Dubinin A. M. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020;45(1):1151–1157. URL: https://www.researchgate.net/publication/332373857_Analysis_of_Nitrogen_Oxides_Emission_by_Modern_Vehicles_when_Used_Hydrogen_or_Other_Natural_and_Synthetic_Fuels_in_Combustion_Chamber (accessed June 15, 2025) (in Russian).

8. Shcheklein S.E., Dubinin A.M., Alwan N.T. Obtaining fresh water from natural and synthetic fuels in the energy sector. *International Journal of Energy Production and Management*. 2021;6(2):193–201. DOI: https://doi.org/10.2495/EQ-V6-N2-193-201

9. Shcheklein S.E., Dubinin A.M. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural and synthetic fuels. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018;177(1):012020. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/177/1/012020 (accessed June 15, 2025).

10. Shcheklein S.E., Dubinin A.M., Gusev A.L. On the emission of water vapor into the atmosphere by energy facilities. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024;11:101–109. URL: https://www.isjaee.com/jour/article/view/2577 (accessed June 15, 2025) (in Russian).

11. Schmidt G.A., Ruedi R.A., Miller R.L., Latsis A.A. Determination of the general greenhouse effect to date. *Journal of geophysical research*. 2010;115:D20106. DOI: https://doi.org/10.1029/2010JD014287

12. Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S. Environmental challenge and sustainable development. Moscow. Progress-Traditsiya, 2000, 415 p. (in Russian).

13. Berdin V.Kh., Gritsevich I.G., Kokorin A.O., Fedorov Yu.N. Greenhouse gases – a global ecological resource: a reference manual. Moscow. WWF Russia, 2004, 137 p. (in Russian).

14. Shcheklein S.E., Dubinin A.M. On the problem of greenhouse gas emissions from electric power facilities. *International Scientific Research Journal*. 2024;149(11):120. URL: https://research-journal.org/archive/11-149-2024-november/10.60797/IRJ.2024.149.104 (accessed June 15, 2025) (in Russian).

15. Kuznetsov V.M. Dry cooling towers against the greenhouse effect. URL: http://www.ng.ru/energy/2008-04-08/22_gradirni.html (assessed June 16, 2025) (in Russian).

16. Boldyrev V.M. It seems that there are no alternatives to dry cooling towers. REA (Rosenergoatom). 2008, no. 6 (in Russian).

17. Lim K.V., Sinyakov A.A., Tashlykov O.L. On the problem of reducing emissions of water vapor as greenhouse gases during operation of thermal and nuclear power plants. In the collection Energy and resource saving. Energy supply. Alternative and renewable energy sources. Yekaterinburg. 2015, pp. 314–316 (in Russian).

18. Ronchinsky A. B. Nuclear power plants with direct heat removal to the final heat sink. Safety, efficiency and economics of nuclear power: collection of reports of the eighth international scientific and technical conf. May 23–25, 2012. Moscow: JSC Concern Rosenergoatom Publ., 2012, p. 632–635 (in Russian).

19. Poltarakov G.I. Dilemma: 'wet' or 'dry' cooling towers. URL: http://proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3823 (assessed June 16, 2025) (accessed June 15, 2025) (in Russian).

20. Shchepetina T.D. On increasing the efficiency of power units with water-cooled reactors (WWR). *Energy: economics, technology, ecology*. 2010;12:21–29. EDN: NBKSAH (in Russian).

21. Zaryankin A.E., Zroichikov N.A., Arianov S.V., Rogalev A.N. Turbine of nuclear power plant with outer steam superheater. Proc. of the VI Conf. on Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Flow. Pilsen, Czech Republic, 2007.

22. Shcheklein S.E. The role of nuclear energy in expanding the fuel and energy base and preserving the climate. *The research trajectory is man, nature, and technology*. 2022;1(1):5–15. URL: https://restrajectory.ru/2Shcheklein%205-15.pdf (accessed June 15, 2025) (in Russian).

23. Shcheklein S.E. Union of thermal power plants and nuclear power plants. *Atomexpert*. 2021;1–2. URL: http://atomicexpert.comunion_of_tpp_and_npp (assessed Aug. 06, 2025) (in Russian).

24. Romanov S.N., Kutakhov A.G., Romanov K.S. Software united cycle for simulation of static operation modes of power plants. Proc. of SPIE – International Society for Optical Engineering. 2002, vol. 4627, p. 306–309. DOI: https://doi.org/10.1117/12.456288

25. OAO «INTER RAO – Elektrogeneratsiya». Annual report on the results of work for 2013. URL: https://irao-generation.ru/upload/docs/eg_godovoy_otchet_2013.pdf (assessed June 21, 2025) (in Russian).

26. 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. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1089(1):012005. DOI: https://doi.org/10.1088/1757-899x/1089/1/012005

27. Shirmanov I.A., Kostarev V.S., Litvinov D.N., Shcheklein S.E. On the possibility of application of compression and non-nuclear steam superheating on fast neutron reactors with a lead coolant to increase the thermodynamic efficiency of the turbine plant. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2021;64(2-2):171–177. DOI: https://doi.org/10.17223/00213411/64/2-2/171 (in Russian).

28. Asmolov V.G., Gusev I.N., Kazansky V.R., Povarov V.P., Statsura D.B. New generation first-of-the kind unit – VVER-1200 design features. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2017;3:5–21. DOI: https://doi.org/10.26583/npe.2017.3.01

29. Ponomarev-Stepnoi N.N. Two-component nuclear power system with a closed nuclear fuel cycle based on BN and VVER reactors. *Atomic Energy*. 2016;120(4):233–239. DOI: https://link.springer.com/article/10.1007/s10512-016-0123-x

30. Adamov E.O., Solovyov D.S. Nuclear power industry: challenges and problem solution *Energeticheskaya politika*. 2017;3:21–30. EDN: ZREKOT (in Russian).

31. Velikhov E.P., Davidenko V.D., Tsibulskiy V.F. Some thoughts on nuclear energy future. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Termoyadernyy sintez*. 2019;42(1):5–14. DOI: https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-1-5-14 (in Russian).

32. Shcheklein S.E. The role of energy in overcoming climate threats. *Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya*. 2021;9:18–30. DOI: https://doi.org/10.7868/S0233361921090044 (in Russian).

Authors

Alexander V. Shutikov, General Director of Rosenergoatom Concern JSC, Cand. Sci. (Engineering),
E-mail: info@rosenergoatom.ru
Ivan I. Sidorov, Director of Beloyarsk NPP,
E-mail: info@rosenergoatom.ru
Yuri V. Nosov, Chief Engineer of Beloyarsk NPP,
E-mail: info@belnpp.ru
Sergey E. Shcheklein, Head of the Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department, Dr. Sci. (Engineering),
E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru