

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104>

К ПРОБЛЕМЕ ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ ОБЪЕКТАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

Научная статья

Щеклеин С.Е.^{1,*}, Дубинин А.М.²¹ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Аннотация

В настоящее время при рассмотрении проблемы влияния энергетики на изменение климата международное сообщество считает основным фактором, определяющим парниковый эффект и, как следствие, повышение температуры геосферы планеты – техногенное повышение содержания в атмосфере углекислого газа. В то же время хорошо известно, что главным парниковым газом, обеспечивающим температурную стабильность планеты, являются присутствующие в составе атмосферы пары воды. В данной работе сделана попытка учета дополнительного усиления парникового эффекта с учетом паров воды, поступающих в атмосферу вследствие энергетического производства на электростанциях разного типа, использующих разные виды топлива (газ, уголь, мазут, уран). Целью работы является расширенное рассмотрение всех основных источников поступления газовых продуктов, сопровождающих энергетическое производство, для выбора перспективных технологических решений, препятствующих дальнейшему усилению парникового эффекта и изменению климата. Рассмотрены три основных потока парниковых газов, поступающих в атмосферу Земли:

- пар воды, испаряющейся в системе охлаждения конденсаторов электростанций;
- пар воды, образующейся при сжигании углеводородных топлив;
- углекислый газ, образующийся при сжигании углеводородных топлив;

Приведены результаты расчетов образования паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов для атомных электростанций, тепловых электростанций (ТЭС), работающих на природном газе, угле и мазуте (в т.ч. с ультра-сверхкритическими параметрами пара), парогазовых установок. Показано, что для электростанций, использующих угольное топливо, основным антропогенным продуктом сгорания является углекислый газ. Для электростанций, использующих углеводородные топлива (газ, мазут) – углекислый газ и пары воды. Для атомных электростанций – только пары воды. Предложен новый параметр, учитывающий совместное воздействие всех потоков парниковых газов для разных типов электростанций и видов топлива на развитие парникового эффекта в геосфере. Показаны пути снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли – повышение коэффициента полезного действия всех типов электростанций путем увеличения параметров пара.

Ключевые слова: тепловые электростанции, атомные электростанции, углекислый газ, испарительное охлаждение, планета Земля.

TO THE PROBLEM OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY ELECTRIC POWER INDUSTRY FACILITIES

Research article

Shcheklein S.Y.^{1,*}, Dubinin A.M.²¹ORCID : 0000-0003-2140-0321;^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

* Corresponding author (s.e.shcheklein[at]urfu.ru)

Abstract

At present, when addressing the problem of energy's impact on climate change, the international community regards the anthropogenic increase of carbon dioxide in the atmosphere as the main factor determining the greenhouse effect and, as a consequence, the increase in the temperature of the planet's geosphere. At the same time, it is well known that the main greenhouse gas that ensures the temperature stability of the planet is water vapour present in the atmosphere. In this paper, an attempt is made to take into account the additional enhancement of the greenhouse effect by taking into account water vapours entering the atmosphere due to energy production at power plants of different types using different fuels (gas, coal, fuel oil, uranium). The aim of the work is to expand the discussion of all major sources of gaseous products accompanying energy production in order to select promising technological solutions to prevent further intensification of the greenhouse effect and climate change. Three main streams of greenhouse gases entering the Earth's atmosphere are reviewed:

- water vapour evaporating in the cooling system of power plant condensers;
- water vapour generated by combustion of hydrocarbon fuels;
- carbon dioxide generated by combustion of hydrocarbon fuels.

The results of calculations of water vapour formation at evaporative cooling of condensers for nuclear power plants, thermal power plants (TPP) operating on natural gas, coal and fuel oil (including ultra-supercritical steam parameters), combined cycle gas turbine plants are given. It is demonstrated that for power plants using coal fuel, the main anthropogenic combustion product is carbon dioxide. For power plants using hydrocarbon fuels (gas, fuel oil) – carbon dioxide and water vapour. For nuclear power plants - only water vapour. A new parameter that takes into account the joint impact of all

greenhouse gas fluxes for different types of power plants and fuels on the development of the greenhouse effect in the geosphere is proposed. The ways to reduce greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere are shown – increasing the efficiency factor of all types of power plants by increasing vapour parameters.

Keywords: thermal power plants, nuclear power plants, carbon dioxide, evaporative cooling, planet Earth.

Введение

Производство и потребление электрической энергии и транспорта в XXI веке требуют все больших объемов потребления ископаемых природных энергоносителей – угля, газа, нефти и урана. Только органических топлив потребляется в настоящее время более 20 млрд. т.у.т. ежегодно [1]. Несмотря на развитие новых возобновляемых источников энергии, доля традиционных технологий 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 скорость их образования – то, что природа создавала 500 млн. лет, мы сжигаем за 500 лет, т.е. в миллион раз быстрее [4].

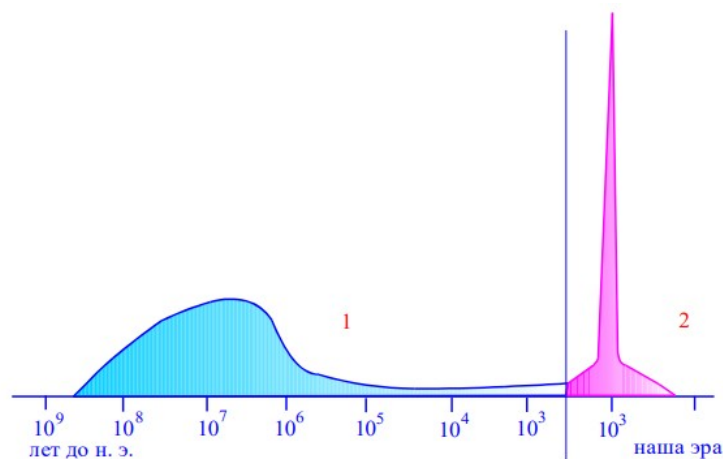


Рисунок 1 - Процессы образования в природе и расходования человеком запасов органического топлива: 1 - процесс образования (500 млн. до н. э. - 10 млн.л. до н.э.); 2 - процесс использования человеком топлива (от 1800 по 2300)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.1>

Ежегодные объемы энергии, поступающие в геосферу от использования всех ископаемых топлив (уголь, нефть, природный газ, уран и пр.) составляющие 160 ТВт*ч пока ещё существенно меньше энергии, поступающей на поверхность Земли от Солнца – 700000 ТВт*ч [5], [6].

В то же время современные масштабы извлечения и использования энергоносителей при достигнутом 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 эмиссией в атмосферу 3-х атомных газов, нарушающих радиационный теплообмен поверхности планеты и окружающего космического пространства – создающих парниковый эффект.

В настоящее время при рассмотрении проблемы влияния энергетики на изменение климата международное сообщество считает основным фактором, определяющим парниковый эффект и, как следствие, повышение температуры геосферы планеты – техногенное повышение содержания в атмосфере углекислого газа. В то же время хорошо известно, что главным парниковым газом, обеспечивающим температурную стабильность планеты, являются присутствующие в составе атмосферы пары воды.

Целью работы является расширенное рассмотрение всех основных источников поступления газовых продуктов, сопровождающих энергетическое производство, для выбора перспективных технологических решений, препятствующих дальнейшему усилению парникового эффекта и изменению климата.

Аббревиатуры в статье:

КЭС – Конденсационные электростанции.

АЭС с ВВЭР – Атомная электростанция с водо-водяным энергетическим реактором.

АЭС с РБН – Атомная электростанция с реактором на быстрых нейтронах.

АЭС с ВТГР – Атомная электростанция с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором.

ТЭС – Тепловая электростанция.

ПГУ – Парогазовая установка.

ТЭС УСКЭС – Тепловая электростанция с ультра-сверхкритическими параметрами пара.

Парниковый эффект и энергетика

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 двуокиси азота (NO_2) [7], [9], [10], [11]. Выполненные в последние десятилетия исследования показывают, что все эти газы создают или способствуют усилению парникового эффекта. Принимая за эталон коэффициент радиационного теплообмена для CO_2 , можно выразить степень опасности других газов в виде парникового «эквивалента CO_2 ». Данные такого анализа приведены в таблице 1 [12].

Таблица 1 - Парниковый эквивалент CO_2 для ряда газовDOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.2>

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 использованием ископаемых топлив, провели ряд экологических конференций Рио-де-Жанейро 1992 г., Киото 1997 г., Париж 2015 г. и др., где был разработан политический и экономический механизм стимулирования защиты климата планеты [13]. Однако в принятых документах признан опасным лишь один газ – углекислый (CO_2).

Реально существуют 4 потока тепловой энергии и парниковых газов в геосферу, имеющих практически равное отрицательное значение:

- 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 конденсационных электростанций (ТЭС – косвенный подогрев (вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса)),
- углекислый газ, образующаяся при сжигании углеводородных топлив (КЭС) – косвенный подогрев (вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса),
- пар воды, образующийся при сжигании углеводородных топлив (КЭС) – косвенный подогрев (вследствие нарушения радиационного баланса Земли и Космоса).

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

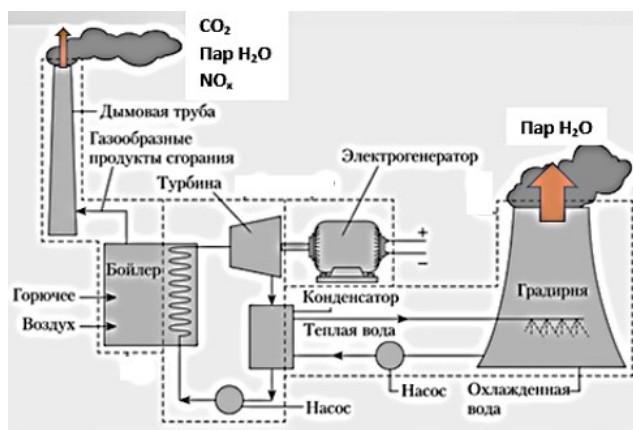


Рисунок 2 - Потоки эмиссии парниковых газов электростанций

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.3>

Наибольшее распространение в современной энергетике получили конденсационные электростанции 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 приведена фотография типичной конденсационной ЭС с градирней.



Рисунок 3 - Современная конденсационная электростанция
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.4>

Методика расчета образования паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов паровых турбин

Пусть N_e – электрическая мощность КЭС, МВт.

Подводимая тепловая мощность $Q_1 = N_e/h$, МВт, где h – коэффициент полезного действия (КПД) КЭС. Значения достигнутых уровней КПД для современных технологий производства электрической энергии ТЭС и АЭС различного типа приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Достигнутые уровни КПД для современных технологий производства электрической энергии

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.5>

Тип КЭС	КПД, %
АЭС с ВВЭР	35
АЭС с РБН	40
АЭС с ВТГР	50
Тепловая ЭС	35-45
Комбинированная парогазовая ЭС (ПГУ)	45-50
Тепловая ЭС с ультра-сверхкритическими параметрами пара (УСКЭС)	55

Мощность, отводимая в системе охлаждения конденсаторов $Q_2 = Q_1 - N_e$, МВт. Испарительное охлаждение конденсаторов $G_w = Q_2/r$, кг/с, где r – скрытая теплота парообразования воды 2450, кДж/кг [14].

Масса испарившейся воды за год

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

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

Производство электрической энергии ТЭС

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

Удельный выход воды: $b = M_w/E_{\text{год}}$. Результаты расчетов по изложенной методике приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Образование паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.6>

Тип ЭС	КПД, %	N_e , МВт	Q_1 , МВт	Q_2 , МВт	G_w , кг/с	M_w , т/год	b , кг/кВт·ч
АЭС ВВЭР	35	1000	2857	1857	758	21830400	2,73
АЭС РБН	40	1000	2500	1500	612	17625600	2,2

АЭС ВТГР	50	1000	2000	1000	408	11750400	1,47
ТЭС- газ	45	1000	2222	1222	500	14400000	1,8
ТЭС- уголь	40	1000	2500	1500	612	17625600	2,2
ТЭС- мазут	35	1000	2857	1857	758	21830400	2,7
ПГУ- газ	50	1000	2000	1000	408	11750400	1,47
УСКЭС	55	1000	1818	818	330	9504000	1,19

3.1. Пример расчета удельного выхода паров воды при испарительном охлаждении конденсатора ТЭС, работающей на природном газе, $h = 45\%$.

Электрическая мощность ТЭС $N_e = 1000$, МВт.

Подводимая тепловая мощность $Q_1 = N_e / h = 1000 / 0,45 = 2222$, МВт

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

Удельный расход топлива (см. табл.4):

$$q_1 = 0,225, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Потребление топлива:

$$G_{год} = Q_1 \cdot T \cdot q_1 = 2222 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 0,225 = 5,33 \cdot 10^9, \text{ кг/год.}$$

Годовое производство электрической энергии ЭС

$$\mathcal{E}_{год} = N_e \cdot T = 10^6 \cdot 8 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^9, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Мощность, отводимая в системе охлаждения конденсаторов

$$Q_2 = Q_1 - N_e = 2222 - 1000 = 1222, \text{ МВт.}$$

Масса воды, испарившейся в системе охлаждения конденсатора ЭС

$$G_w = Q_2 / r = 1222 / 2459 = 499, \text{ кг/с.}$$

Масса воды, испарившейся в системе охлаждения конденсатора ЭС за год

$$M_B = G_w \cdot T_{год} = 499 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 14400 \cdot 10^6, \text{ кг/год.}$$

Удельный выход воды

$$b_{исп} = M_B / \mathcal{E}_{год} = 14400 \cdot 10^6 / 8 \cdot 10^9 = 1,8, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Анализ таблицы 3 показывает, что наибольшее образование паров воды происходит на ЭС, работающей на мазуте. Наименьшее на ЭС с ультра-сверхкритическими параметрами пара (УСКЭС), АЭС с ВТГР и БР, а также ПГУ.

Методика расчета удельного выхода водяного пара в атмосферу Земли при сжигании органических топлив

Электрическая мощность ЭС N_e , МВт.

Подводимая тепловая мощность $Q_1 = N_e / h$, МВт, где h - коэффициент полезного действия (КПД) ЭС.

Теплота сгорания топлива Q_n^p , МДж/кг.

Расход топлива

$$b_T = Q_1 / Q_n^p, \text{ кг/с}$$

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

Годовой расход топлива

$$B_T = b_T \cdot T_{год}, \text{ кг/год.}$$

Годовое производство электрической энергии ЭС

$$\mathcal{E}_{год} = N_e \cdot T, \text{ кВт} \cdot \text{ч/год.}$$

Удельный расход топлива

$$q_1 = B_T / \mathcal{E}_{год}, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

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

Энергия топлива

$$E_T = Q_1 \cdot T_{год} \cdot q_1 \cdot Q_n^p, \text{ МДж.}$$

Образование паров воды от сгорания топлива

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

Удельный выход паров воды

$$G = G_{пар} / \mathcal{E}_{год}.$$

Результаты расчетов по данной методике для различных типов ТЭС и АЭС приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Образование паров воды при сжигании топлива

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.7>

Тип ЭС	Q_1 , МВт	Теплота сгорания, МДж/кг	Удельный расход топлива, кг/кВт·ч	Потребление органического топлива, т/год	Пары воды, т/год	Удельный выход паров воды, кг/кВт·ч

	N_e/h ,	Q_n^p	q_i	B_T	M_B	$g_{пар}$
АЭС	2857	0	0	0	0	0
АЭС РБН	2500	0	0	0	0	0
АЭС ВТГР	2000	0	0	0	0	0
ТЭС- газ	2222	40	0,225	$7,1 \cdot 10^6$	$13 \cdot 10^6$	0,81
ТЭС- уголь	2500	30	0,45	$9 \cdot 10^6$	0	0
ТЭС- мазут	2857	50	0,25	$5,7 \cdot 10^6$	$9,7 \cdot 10^6$	1,2
ПГУ-газ	2000	40	0,2	$4,8 \cdot 10^6$	$5,9 \cdot 10^6$	1,47
УСКЭС-газ	1818	40	0,25	$3,6 \cdot 10^6$	$6,7 \cdot 10^6$	0,83
УСКЭС-уголь	1818	30	0,33	$4,8 \cdot 10^6$	0	0

4.1. Пример расчета удельного выхода паров воды при сгорании топлива ТЭС, работающей на природном газе, $h=45\%$

Электрическая мощность КЭС $N_e=1000$, МВт.

Подводимая тепловая мощность $Q_i = N_e/h = 1000/0,45=2222$, МВт

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

Теплота сгорания топлива $Q_n^p=40$, МДж/кг.

Расход топлива

$$b_T = Q_i/Q_n^p = 2222 \cdot 10^3/40 \cdot 10^3 = 55,5, \text{ кг/с}$$

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

Годовой расход топлива

$$B_T = b_T \cdot T_{год} = 55,5 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 3,6 \cdot 10^3 = 1598 \cdot 10^6, \text{ кг/год.}$$

Годовое производство электрической энергии ЭС

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

Удельный расход топлива

$$q_1 = B_T/\Theta_{год} = 1598 \cdot 10^6/8 \cdot 10^9 = 0,2, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Удельный выход паров воды при сжигании топлива $g=0,046$, кг/МДж [8].

Энергия топлива

$$E_T = Q_i \cdot T_{год} \cdot q_1 \cdot Q_n^p = 2222 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^3 \cdot 0,225 \cdot 40 = 142 \cdot 10^9, \text{ МДж.}$$

Образование паров воды от сгорания топлива

$$G_{пар} = E_T \cdot g = 142 \cdot 10^9 \cdot 0,046 = 5,9 \cdot 10^9, \text{ кг/год.}$$

Удельный выход паров воды

$$G = G_{пар}/\Theta_{год}.$$

Удельный выход воды

$$b_{топл} = M_B/\Theta_{год} = 5,9 \cdot 10^9/8 \cdot 10^9 = 0,81, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч.}$$

Анализ таблицы 4 показывает, что наибольшее образование паров воды происходит на ЭС, работающей на природном газе. Наименьшее на ТЭС с ультра-сверхкритическими параметрами пара (УСКЭС), АЭС всех типов, а также ТЭС, работающих на угле.

Общий выход паров воды и диоксида углерода (парниковых газов) от электростанций разных типов

В таблице 5 и рисунке 4 приведены данные по удельному образованию парниковых газов и паров воды при выработке электрической энергии на ЭС разных типов.

Таблица 5 - Удельное образование парниковых газов и паров воды при выработке электрической энергии на ЭС разных типов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.8>

Тип ЭС	b_{CO_2} , кг/кВт·ч	$b_{топл}$, кг/кВт·ч	$b_{испар}$, кг/кВт·ч
АЭС ВВЭР	0	0	2,73
АЭС РБН	0	0	2,2
АЭС ВТГР	0	0	1,47
ТЭС- уголь	0,6	0	2,2
ТЭС- газ	0,5	0,81	1,8
ТЭС- мазут	0,4	1,2	1,8
ПГУ-газ	0,3	0,74	1,5
УСКЭС-газ	0,25	0,83	1,2
УСКЭС-уголь	0,6	0	1,2

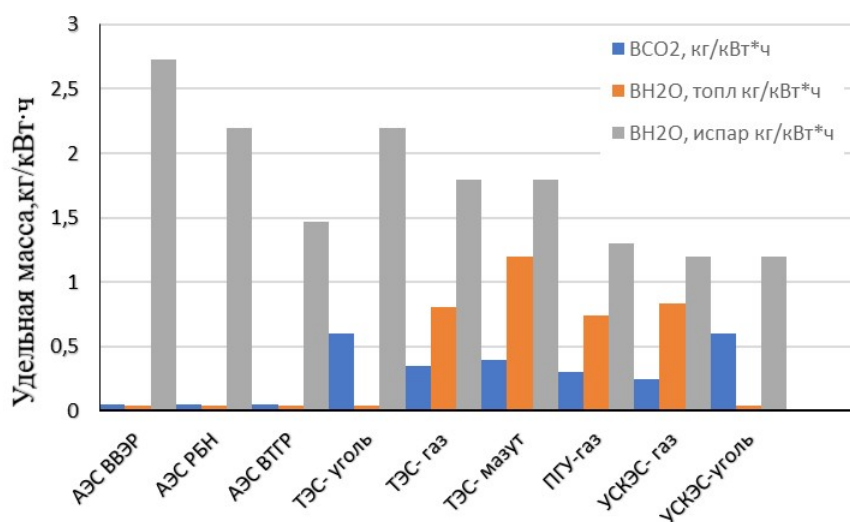


Рисунок 4 - Удельные массы образования CO₂ и паров воды
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.9>

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:

$$P_{\text{сум}} = K_{\text{CO}_2} \cdot b_{\text{CO}_2} + K_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (b_{\text{топл}} + b_{\text{исп}}), \text{ экв. CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч},$$

где $K_{\text{CO}_2} = 1 \text{ экв. CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$, $K_{\text{H}_2\text{O}} = 5 \text{ экв. CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ (см. табл.1),

b_{CO_2} – удельный выход диоксида углерода при сгорании топлива, кг/кВт·ч,

$b_{\text{топл}}$ – удельный выход паров воды при сгорании топлива, кг/кВт·ч,

$b_{\text{исп}}$ – удельный выход паров воды при испарительном охлаждении конденсаторов ЭС, кг/кВт·ч,

В таблице 6 и на рисунке 5 приведены данные расчетов суммарного влияния на парниковый эффект паров воды и диоксида углерода и значения коэффициента сравнения с данными для АЭС типа ВВЭР.

Таблица 6 - Результаты расчетов суммарного влияния на парниковый эффект паров воды и диоксида углерода коэффициента сравнительного воздействия на геосферу по сравнению с АЭС ВВЭР

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.10>

Тип ЭС	$P_{\text{сум}}$, кг экв. CO ₂ /кВт·ч	$K = P_{\text{сум}}/P_{\text{АЭС ВВЭР}}$
АЭС ВВЭР	13,65	1
АЭС РБН	11	0,8
АЭС ВТГР	7,65	0,56
ТЭС- уголь	11,6	0,85
ТЭС- газ	13,59	0,99
ТЭС- мазут	15,4	1,13
ПГУ-газ	11,5	0,84
УСКЭС-газ	10,4	0,76
УСКЭС-уголь	6,6	0,48

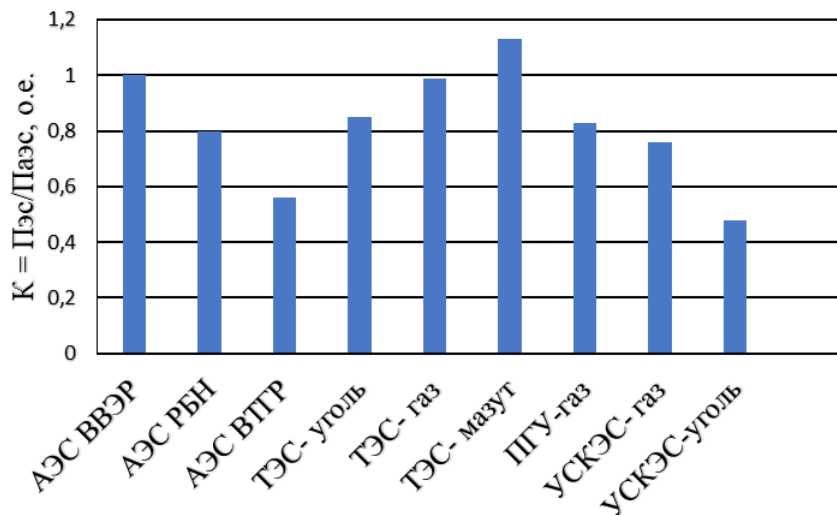


Рисунок 5 - Коэффициент воздействия на геосферу по сравнению с АЭС типа ВВЭР
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.11>

5.1. Пример расчета суммарного влияния на парниковый эффект паров воды и диоксида углерода АЭС, работающей на природном газе

$$P_{\text{сум}} = 1 \cdot 0,5 + 5 \cdot (1,8 + 0,81) = 13,59, \text{ кг экв. CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч.}$$

Коэффициента сравнительного воздействия на геосферу по сравнению с АЭС ВВЭР

$$K = P_{\text{сум}}/P_{\text{аэс ВВЭР}} = 13,59/13,65 = 0,99.$$

Анализ таблицы 6 показывает, что самое малое воздействия на геосферу оказывают АЭС с ВТГР и ТЭС с сверхкритическими параметрами генерируемого острого пара.

Установлено, что наиболее сильное воздействие на геосферу оказывают 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 сверхкритическими параметрами генерируемого острого пара, работающим на угольном топливе и АЭС типа БН и ВТГР.

Очевидным также становится, например необходимость внедрения сухих градирен [15], [16], [18], [19], сверхкритических параметров пара на ТЭС для повышения КПД [20], [21], [24], [25], создания АЭС с высокими температурными характеристиками активных зон [26], [27], [28], [29], разработка комбинированных атомно-тепловых электростанций [30], [31], [32].

Заключение

Показано, что для электростанций, использующих угольное топливо, основным антропогенным продуктом сгорания является углекислый газ. Для электростанций, использующих углеводородные топлива (газ, мазут) – углекислый газ и пары воды. Для атомных электростанций – только пары воды.

Предложен новый параметр, учитывающий совместное воздействие всех потоков парниковых газов для разных типов электростанций и видов топлива на развитие парникового эффекта в геосфере.

Основные пути снижения эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли – повышение коэффициента полезного действия всех типов электростанций путем увеличения параметров пара. Лидирующие на сегодняшний день технологии снижения эмиссии парниковых газов – ТЭС с сверхкритическими параметрами пара на угольном топливе, АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

Перспективными технологиями являются АЭС с высокотемпературным и жидкометаллическими и газоохлаждаемыми реакторами и комбинированные атомно-тепловые электростанции.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Программа развития Уральского федерального университета в рамках Программы «Приоритет-2030») Номер гранта: FEUZ-2022-0031.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Борисов А.Н., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.12>

Funding

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Development Program of the Ural Federal University within the framework of the Priority-2030 Program) Grant number: FEUZ-2022-0031.

Conflict of Interest

None declared.

Review

Borisov A.N., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.149.104.12>

Список литературы / References

1. Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / Под ред. А.А. Макарова, Т.А. Митровой, В.А. Кулагина. — М.: ИНЭИ РАН-Московская школа управления Сколково, 2019. — 210 с.
2. Смиль В. Энергия и цивилизация. От первобытности до наших дней / В. Смиль; пер. Д.Л. Казаков. — М.: Бомбора, 2020. — 480 с.
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> (accessed: 01.05.24).
4. Щеклеин С.Е. Человек — энергия — природа / С.Е. Щеклеин. — Екатеринбург: УГТУ, 1998. — 58 с.
5. Виссарионов В.И. Солнечная энергетика: Учебное пособие для вузов / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова [и др.]; под ред. В.И. Виссарионова. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 320 с.
6. Davies J.H. Earth's surface heat flux / J.H. Davies, D.R. Davies // *Solid Earth*. — 2010. — № 1. — P. 5–24. — DOI: 10.5194/se-1-5-2010.
7. Shcheklein S.E. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // *International Journal of Hydrogen Energy*. — 2020. — Vol. 45. — № 1. — P. 1151–1157.
8. Shcheklein S.E. Obtaining fresh water from natural and synthetic fuels in the energy sector / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin, N.T. Alwan // *International Journal of Energy Production and Management*. — 2021. — Vol. 6. — № 2. — P. 193–201.
9. Shcheklein S.E. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural and synthetic fuels / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 177. — № 1. — P. 012020.
10. Shcheklein S.E. The Investigation of Fuel Type Influence on the Energy Indicators of the Electrochemical Generator in the Cogeneration Unit / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. — 2018. — № 16-18. — P. 12–22.
11. Schmidt G.A. Determination of the general greenhouse effect to date / G.A. Schmidt, R.A. Ruedi, R.L. Miller [et al.] // *Journal of Geophysical Research*. — 2010. — Vol. 115. — D20106. — DOI: 10.1029/2010JD014287.
12. Данилов-Данилян В.И. Экологический вызов и устойчивое развитие / В.И. Данилов-Данилян, К.С. Лосев. — М.: Прогресс-Традиция, 2000. — 414 с.
13. Бердин В.Х. Парниковые газы – глобальный экологический ресурс: справочное пособие / В.Х. Бердин, И.Г. Грицевич, А.О. Кокорин [и др.]. — М.: WWF России, 2004.
14. Королев В.Н. Техническая термодинамика: Учебное пособие для вузов / В.Н. Королев, Е.М. Толмачев. — Екатеринбург: УГТУ, 2001. — С. 180.
15. Кузнецов В.М. Сухие градирни против парникового эффекта / В.М. Кузнецов. — URL: http://www.ng.ru/energy/2008-04-08/22_gradirni.html (дата обращения: 01.05.24).
16. Болдырев В.М. Похоже, альтернатив для сухих градирен нет / В.М. Болдырев // *Росэнергоатом*. — 2008. — № 6.
17. Лим К.В. О проблеме снижения выбросов водяных паров, как парниковых газов, при работе ТЭС и АЭС / К.В. Лим, А.А. Синяков, О.Л. Ташлык // *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 / А.Б. Рончинский // *Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: сб. докладов восьмой междунар. науч.-техн. конф. 23-25 мая 2012 г.* — М.: Концерн Росэнергоатом, 2012. — С. 632–635.
19. Полтараков Г.И. Дилемма: градирни «мокрые» или «сухие» / Г.И. Полтараков. — URL: <http://proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3823> (дата обращения: 01.05.24).
20. Бабенко И.А. Технологии суперсверхкритических параметров пара в современной энергетике / И.А. Бабенко, В.Л. Шульман // *Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института*. — Екатеринбург: УрФУ, 2018. — С. 69–71.
21. Технологическая платформа «Экологически чистая тепловая энергетика высокой эффективности». — URL: http://tprusenergy.ru/technology/coal_blocks_with_supercritic_al_steam_parameters/ (дата обращения: 05.05.2024).

22. Энергоконсультант «Основы современной энергетики». — URL: <http://www.energocon.com/pages/id1079.html> (дата обращения: 05.05.2024).
23. Всероссийский теплотехнический институт «Аудит энергоблока СКР-100 на суперсверхкритические параметры пара установленного на Каширской ГРЭС». — URL: <http://vti.ru/about/scientific-technical-council/itogizasedanij-nts/30-maya-2011-goda-sostoyaloszsasedanie-nts-oao-vti-po-auditu-energlobloka-skr100-na-supersverhkriticheskie-parametry-paraustanov/> (дата обращения: 05.05.2024).
24. ОГК-2 «Проект строительства энергоблока ПСУ-660». — URL: http://www.ogk2.ru/rus/investment/objects/psu_660_territoriya_troitskoj_gres.php (дата обращения: 05.05.2024).
25. Рогалев Н.Д. Перспективные конструктивные решения паровых котлов для энергоблоков с ультрасверхкритическими параметрами пара / Н.Д. Рогалев, В.Б. Прохоров, А.Н. Рогалев [и др.] // Труды международной научно-практической конференции «Уголь-ЭКО-2016». — М.: Издательский дом МЭИ, 2016. — С. 111–120.
26. Митенков Ф.М. Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор — энергоисточник для промышленного производства водорода / Ф.М. Митенков [и др.] // Атомная энергия. — 2004. — Т. 97. — № 6. — С. 432–446.
27. Пономарев-Степной Н.Н. Использование программы MSU для анализа результатов критических экспериментов с шаровыми твэлами ВТГР на стенде «Астра» / Н.Н. Пономарев-Степной [и др.] // Атомная энергия. — 2004. — Т. 97. — № 4. — С. 243–252.
28. Логинова С.С. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы / С.С. Логинова, О.А. Кухнина, Т.В. Суменкова [и др.] // Вестник науки и образования. — 2018. — № 15-2 (51). — С. 10–14.
29. Щепетина Т.Д. О повышении КПД энергоблоков с водо-водяными реакторами (ВВР) / Т.Д. Щепетина // Энергия: экономика, техника, экология. — 2010. — № 12. — С. 21–29.
30. Zaryankin A.E. Turbine of nuclear power plant with outer steam superheater / A.E. Zaryankin, N.A. Zroichikov, S.V. Arianov [et al.] // Proceedings of the 6-th Conference on Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Flow. — Pilsen, 2007.
31. Щеклеин С.Е. Повышение энергоэффективности АЭС / С.Е. Щелкин, О.Л. Ташлыков, А.М. Дубинин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. — 2015. — № 4. — С. 15–25.
32. Щеклеин С.Е. Роль энергетики в преодолении климатических угроз / С.Е. Щеклеин // Энергия: экономика, техника, экология. — 2021. — № 9. — С. 18–30.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Prognoz razvitija jenergetiki mira i Rossii 2019 [World and Russian Energy Forecast 2019] / Ed. by A.A. Makarov, T.A. Mitrova, V.A. Kulagin. — М.: INEI RAS-Moscow School of Management Skolkovo, 2019. — 210 p. [in Russian]
2. Smil V. Jenergija i civilizacija. Ot pervobytnosti do nashih dnei [Energy and civilization. From primitive times to the present day] / V. Smil; transl. by D.L. Kazakov. — М.: Bimbora, 2020. — 480 p. [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> (accessed: 01.05.24).
4. Shheklein S.E. Chelovek — jenergija — priroda [Man – energy – nature] / S.E. Shheklein. — Yekaterinburg: USTU, 1998. — 58 p. [in Russian]
5. Vissarionov V.I. Solnechnaja jenergetika: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Solar energy: Textbook for universities] / V.I. Vissarionov, G.V. Derjugina, V.A. Kuznecova [et al.]; ed. by V.I. Vissarionov. — М.: MPEI Publishing House, 2008. — 320 p. [in Russian]
6. Davies J.H. Earth's surface heat flux / J.H. Davies, D.R. Davies // Solid Earth. — 2010. — № 1. — P. 5–24. — DOI: 10.5194/se-1-5-2010.
7. Shcheklein S.E. Analysis of nitrogen oxide emissions from modern vehicles using hydrogen or other natural and synthetic fuels in combustion chamber / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // International Journal of Hydrogen Energy. — 2020. — Vol. 45. — № 1. — P. 1151–1157.
8. Shcheklein S.E. Obtaining fresh water from natural and synthetic fuels in the energy sector / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin, N.T. Alwan // International Journal of Energy Production and Management. — 2021. — Vol. 6. — № 2. — P. 193–201.
9. Shcheklein S.E. Stoichiometric analysis of air oxygen consumption in modern vehicles using natural and synthetic fuels / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. — IOP Publishing, 2018. — Vol. 177. — № 1. — P. 012020.
10. Shcheklein S.E. The Investigation of Fuel Type Influence on the Energy Indicators of the Electrochemical Generator in the Cogeneration Unit / S.E. Shcheklein, A.M. Dubinin // Alternative Energy and Ecology (ISJAE). — 2018. — № 16-18. — P. 12–22.
11. Schmidt G.A. Determination of the general greenhouse effect to date / G.A. Schmidt, R.A. Ruedi, R.L. Miller [et al.] // Journal of Geophysical Research. — 2010. — Vol. 115. — D20106. — DOI: 10.1029/2010JD014287.
12. Danilov-Daniljan V.I. Jekologicheskij vyzov i ustojchivoje razvitie [Environmental challenge and sustainable development] / V.I. Danilov-Daniljan, K.S. Losev. — М.: Progress-Tradicija, 2000. — 414 p. [in Russian]
13. Berdin V.H. Parnikovye gazy – global'nyj jekologicheskij resurs: spravocnoe posobie [Greenhouse gases – a global environmental resource: a reference manual] / V.H. Berdin, I.G. Gricevich, A.O. Kokorin [et al.]. — М.: WWF of Russia, 2004. [in Russian]
14. Korolev V.N. Tehnicheskaja termodinamika: Uchebnoe posobie dlja vuzov [Technical thermodynamics: Textbook for universities] / V.N. Korolev, E.M. Tolmachev. — Yekaterinburg: USTU, 2001. — P. 180. [in Russian]

15. Kuznecov V.M. Suhie gradirni protiv parnikovogo jeffekta [Dry cooling towers against the greenhouse effect] / V.M. Kuznecov. — URL: http://www.ng.ru/energy/2008-04-08/22_gradirni.html (accessed: 01.05.24). [in Russian]
16. Boldyrev V.M. Pohozhe, al'ternativ dlja suhikh gradiren net [There seem to be no alternatives for dry cooling towers] / V.M. Boldyrev // Rosjenergoatom. — 2008. — № 6. [in Russian]
17. Lim K.V. O probleme snizhenija vybrosov vodjanyh parov, kak parnikovyh gazov, pri rabote TJeS i AJeS [About the problem of reducing water vapour emissions as greenhouse gases at TPP and NPP operation] / K.V. Lim, A.A. Sinjakov, O.L. Tashlykov // Jenergo-i resursosberezenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljaemye istochniki jenergii [Energy and Resource Saving. Energy supply. Non-traditional and renewable energy sources]. — Yekaterinburg, 2015. — P. 314–316. [in Russian]
18. Ronchinskij A.B. AJeS s neposredstvennym otvodom tepla konechnomu poglotitelju [NPP with direct heat removal to the final absorber] / A.B. Ronchinskij // Bezopasnost', jeffektivnost' i jekonomika atomnoj jenergetiki: sb. dokladov vos'moj mezhdunar. nauch.-tehn. konf. 23-25 maja 2012 g. [Safety, efficiency and economics of nuclear power engineering: Collection of reports of the Eighth International Scientific and Technical Conference 23-25 May 2012]. — M.: Konzern Rosjenergoatom, 2012. — P. 632–635. [in Russian]
19. Poltarakov G.I. Dilemma: gradirni «mokrye» ili «suhie» [The dilemma: "wet" or "dry" cooling towers] / G.I. Poltarakov. — URL: <http://proatom.ru/modules.php?file=print&name=News&sid=3823> (accessed: 01.05.24). [in Russian]
20. Babenko I.A. Tehnologii supersverhkriticheskij parametrov para v sovremennoj jenergetike [Technologies of supercritical steam parameters in modern power engineering] / I.A. Babenko, V.L. Shul'man // Trudy tret'ej nauchno-tehnicheskoy konferencii molodyh uchenyh Ural'skogo jenergeticheskogo instituta [Proceedings of the Third Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Ural Energy Institute]. — Yekaterinburg: UrFU, 2018. — P. 69–71. [in Russian]
21. Tehnologicheskaja platforma «Jekologicheski chistaja teplovaja jenergetika vysokoj jeffektivnosti» [Technology platform "Environmentally friendly thermal power engineering of high efficiency"]. — URL: http://tprusenergy.ru/technology/coal_blocks_with_supercritical_steam_parameters/ (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
22. Jenergokonsul'tant «Osnovy sovremennoj jenergetiki» [Energy consultant "Fundamentals of Modern Energy"]. — URL: <http://www.energocon.com/pages/id1079.html> (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
23. Vserossijskij teplotehnicheskij institut «Audit jenerglobloka SKR-100 na supersverhkriticheskie parametry para ustanovlennogo na Kashirskoj GRJeS» [All-Russian Thermal Engineering Institute "Audit of SCR-100 power unit for super-supercritical steam parameters installed at Kashirskaya GRES"]. — URL: <http://vti.ru/about/scientific-technical-council/itogizasedanij-nts/30-maya-2011-goda-sostoyaloszasedanie-nts-oao-vti-po-auditu-energobloka-skr100-na-supersverhkriticheskie-parametry-paraustanov/> (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
24. OGK-2 «Proekt stroitel'stva jenerglobloka PSU-660» [OGK-2 "PSU-660 power unit construction project"]. — URL: http://www.ogk2.ru/rus/investment/objects/psu_660_territoriya_troitskoy_gres.php (accessed: 05.05.2024). [in Russian]
25. Rogalev N.D. Perspektivnye konstruktivnye reshenija parovyh kotlov dlja jenergloblokov s ul'trasverhkriticheskimi parametrami para [Perspective design solutions of steam boilers for power units with ultra-supercritical steam parameters] / N.D. Rogalev, V.B. Prohorov, A.N. Rogalev [et al.] // Trudy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Ugol'-JeKO-2016» [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference "Coal-ECO-2016"]. — M.: MPEI Publishing House, 2016. — P. 111–120. [in Russian]
26. Mitenkov F.M. Vysokotemperaturnyj gazoohlazhdaemyj reaktor —jenergoistochnik dlja promyshlennogo proizvodstva vodoroda [High-temperature gas-cooled reactor-energy source for industrial hydrogen production] / F.M. Mitenkov [et al.] // Atomnaja jenergija [Atomic Energy]. — 2004. — Vol. 97. — № 6. — P. 432–446. [in Russian]
27. Ponomarev-Stepnoj N.N. Ispol'zovanie programmy MCU dlja analiza rezul'tatov kriticheskikh jeksperimentov s sharovymi tvjelami VTGR na stende «Astra» [Use of MCU programme to analyse the results of critical experiments with HTGR globular fuel elements at the "Astra" stand] / N.N. Ponomarev-Stepnoj [et al.] // Atomnaja jenergija [Atomic Energy]. — 2004. — Vol. 97. — № 4. — P. 243–252. [in Russian]
28. Loginova S.S. Vysokotemperaturnye gazoohlazhdaemye reaktory [High-temperature gas-cooled reactors] / S.S. Loginova, O.A. Kuhnina, T.V. Sumenkova [et al.] // Vestnik nauki i obrazovanija [Bulletin of Science and Education]. — 2018. — № 15-2 (51). — P. 10–14. [in Russian]
29. Shhepetina T.D. O povyshenii KPD jenergloblokov s vodo-vodjanyimi reaktorami (VVR) [On increasing the efficiency of power units with water-water reactors (WWR)] / T.D. Shhepetina // Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija [Energy: economy, technology, ecology]. — 2010. — № 12. — P. 21–29. [in Russian]
30. Zaryankin A.E. Turbine of nuclear power plant with outer steam superheater / A.E. Zaryankin, N.A. Zroichikov, S.V. Arianov [et al.] // Proceedings of the 6-th Conference on Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Flow. — Pilsen, 2007.
31. Shheklein S.E. Povyshenie jenergojeffektivnosti AJeS [Increase of NPP energy efficiency] / S.E. Shhelkin, O.L. Tashlykov, A.M. Dubinin // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jadernaja jenergetika [Proceedings of higher educational institutions. Nuclear power engineering]. — 2015. — № 4. — P. 15–25. [in Russian]
32. Shheklein S.E. Rol' jenergetiki v preodolenii klimaticeskikh ugroz [The role of energy in overcoming climate threats] / S.E. Shheklein // Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija [Energy: economics, technology, and ecology]. — 2021. — № 9. — P. 18–30. [in Russian]