**ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ И МИРЕ (ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ
ПРИЕМЛЕМОСТЬ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ XXI ВЕКА)*****О. Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин, Е. В. Шарифьянов***ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина»,
ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, Россия, 620002,
тел./факс +7(343)375-95-08, e-mail: otashlykov@list.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.10.005

Заключение совета рецензентов: 23.09.20

Заключение совета экспертов: 23.09.20

Принято к публикации: 29.09.20

Обоснована роль ядерной энергетики в решении экологических проблем. Приведены источники энергии с самым низким объемом выбросов CO₂ с учетом выбросов в течение всего энергетического жизненного цикла (гидроэлектростанции, АЭС и ветряные электростанции). Обосновано преимущество АЭС среди этих источников энергии. Приведены данные по состоянию атомной энергетики в настоящее время. Сформулированы системные проблемы современной ядерной энергетики, использующей в подавляющем большинстве реакторы на тепловых нейтронах. Обобщены требования к перспективной ядерной энергетике XXI века. Представлена информация о форуме GIF (the Generation IV International Forum), созданном в 2001 г. Описаны два основных варианта обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ): однократный цикл, при котором топливо используется только один раз (открытый ядерный топливный цикл – ЯТЦ), после чего хранится как отходы, и многократный с переработкой ОЯТ и возвращением в цикл неиспользованного урана и накопленного плутония (замкнутый ЯТЦ). Проведена оценка возможности использования реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем в составе ядерных энергетических систем четвертого поколения, в решении проблем топливообеспечения и минимизации объемов радиоактивных отходов. Приведены сведения о двухкомпонентной структуре генерирующих мощностей на тепловых и быстрых реакторах, объединяемой замкнутым ЯТЦ, которая может обеспечить решение системных проблем ядерной энергетики (накопление ОЯТ, обращение с радиоактивными отходами) и кардинальное повышение эффективности использования природного урана. Обобщены результаты анализа воздействия АЭС с реакторами БН-600 и БН-800 на окружающую среду и персонал. Представлены возможные варианты компоновок реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Обосновано преимущество интегральной компоновки с точки зрения повышения безопасности. Приведены основные характеристики реактора БН-1200, обеспечивающие безопасность, малоотходность, отсутствие ограничений по сырьевой базе на длительный период времени. Описаны конструкционные особенности быстрых натриевых реакторов, обеспечивающие их высокую безопасность для персонала и окружающей среды.

Ключевые слова: атомная электростанция, реактор на быстрых нейтронах, безопасность, коллективная доза, замкнутый топливный цикл, ядерная энергетическая система.

**INNOVATIVE DIRECTION OF THE DEVELOPMENT OF NUCLEAR POWER IN
RUSSIA AND IN THE WORLD (ENVIRONMENTAL ACCEPTABILITY OF NUCLEAR
POWER OF THE XXI CENTURY)**

O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein, E.V. Sharifyanov

Federal State Autonomus Educational Institution of Higher Education
 “Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin”,
 19 Mira ave., Yekaterinburg, 620002, Russia, Tel.: (343) 375-95-08, e-mail: otashlykov@list.ru

doi: 10.15518/isjaee.2020.10.005

Referred: 23.09.20

Received in revised form: 23.09.20

Accepted: 29.09.20

The role of nuclear energy in environmental problems solving is substantiated. The energy sources with the lowest emission of CO₂ are given accounting the emission throughout the whole life cycle of the energy source (hydroelectric, nuclear and wind power plants). The advantage nuclear power plants possess over these energy sources is substantiated. The data on the state of nuclear energy at present are given. The general problems are formulated of up-to-date nuclear energy using the overwhelming majority of thermal neutron reactors. The requirements to promising nuclear energy of the XXI century are summarized. The information is provided on the GIF – the Generation IV International Forum which was created in 2001. Two main ways of spent nuclear fuel (SNF) treatment are described. The single-phase cycle, the so-called open nuclear fuel cycle, implies the single use of nuclear fuel and the subsequent storage of it as waste products. The recycling of nuclear fuel is called closed fuel cycle and implies the return of unutilized uranium and accumulated plutonium into the cycle. The possibility of application of fast neutron reactors with sodium coolant as a part of the fourth generation nuclear energy systems in solving the problems of fuel supply and minimizing of the radioactive waste amount has been assessed. The data are given on the two-component structure of power system with thermal and fast neutron reactors combined by the closed fuel cycle which can provide the solution of general problems of the nuclear energy such as SNF accumulation and radioactive waste treatment, and supply the cardinal increase of the natural uranium use efficiency. The results of the analysis of the impact of nuclear power plants with BN-600 and BN-800 reactors on the environment and personnel are summarized. The possible variants of layout of fast neutron reactors with sodium coolant are presented. The advantage of pool type is substantiated from the point of view of safety increase. Given are the main characteristics of the BN-1200 reactor which ensure safety, low-waste operation, absence of limitations on raw material supplies for a long period of time. The design features of fast sodium reactors which ensure its high safety for personnel and environment are described.

Keywords: nuclear power plant, fast breeder reactor, safety, collective dose, closed nuclear fuel cycle, nuclear energy systems.



Ташлыков Олег
 Леонидович
 Tashlykov Oleg
 Leonidovich

Сведения об авторе: канд. тех. наук, доцент, Уральский федеральный университет.

Образование: Томский политехнический институт, 1978.

Область научных интересов: ядерная энергетика и технологии, радиационная безопасность, оптимизация ремонтных работ на АЭС.

Публикации: 2 монографии, 5 учебников, 10 учебных пособий, 353 научных публикаций

Количество публикаций в РИНЦ – 353; цитирований – 1080; индекс Хирша -18.

Количество публикаций в Scopus – 50; цитирований - 269; индекс Хирша – 9.

Количество публикаций в Web of Science – 30; цитирований – 162; индекс Хирша - 7.

Идентификатор автора в Scopus: 36992762900.

Идентификатор автора в Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-6397-015X>

Information about the author: Associate Professor of “Nuclear Power Plants and Renewables” Department Cand. Sci (Engineering), Ural Federal University

Education: Tomsk Polytechnic Institution , 1978

Research area: nuclear energy and technologies, personnel radiation safety, optimization of repair works at NPP

Publications: 2 monographs, 5 textbooks, 10 tutorials, 353 scientific works.





Шарифьянов Евгений
Вильевич
Sharifyanov Eugene
Vilyevich

Сведения об авторе Уральский федеральный университет, студент кафедры «Атомные станции и ВИЭ»

Образование: Уральский федеральный университет.

Область научных интересов: моделирование теплогидравлических процессов в ядерных энергетических установках, радиационная безопасность персонала и населения.

Публикации: 2

Information about the author: Ural Federal University, student of department «Nuclear Power Plants and Renewables»

Education: Ural Federal University

Research area: modelling of thermal hydraulic processes in Nuclear Power Plants, radiation safety of personnel and the public.

Publications: 2



Щеклеин Сергей
Евгеньевич
Sergey E. Shcheklein

Сведения об авторе: доктор технических наук, профессор, действительный член Международной энергетической академии

Место работы: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», заведующий кафедрой.

Образование: Уральский политехнический институт (УГТУ-УПИ) (1972 г.).

Награды и научные премии: Заслуженный энергетик России, Лауреат Национальной экологической премии Фонда им. В.И. Вернадского.

Область научных интересов: термодинамика ядерных энергетических установок, проблемы атомной энергетики и теплофизики двухфазных потоков, продление ресурса и повышение надежности оборудования АЭС, солнечная энергетика, ветровая энергетика, биоэнергетика.

Публикации: более 450 научных трудов, в том числе 5 монографий, 80 изобретений,

индекс Хирша РИНЦ -13.

Information about the author: Doctor of technical science, professor, a full member of the International Energy Academy.

Workplace: Urals Federal University, head of Atomic Stations and Renewable Energy Sources Department.

Education Urals Polytechnic Institute (1972).

Awards and scientific awards: Distinguished Energy of Russia, Winner of the national environmental award of the V. I. Vernadsky.

Research area: nuclear power units thermodynamics; questions of nuclear energy and thermophysics of the two-phase flows; NPP equipment lifetime enduring and reliability increasing; solar, wind and bioenergetics.

Publications: more than 450 scientific works, including 5 monographs, 80 inventions,

Hirsch Index -13.

Введение

Анализ прогнозов развития энергетики показывает, что к 2050 году резко возрастет спрос на энергию, особенно в развивающихся странах, где свыше миллиарда человек не имеют доступа к современным энергетическим услугам. Для удовлетворения глобального спроса на энергию потребуются значительно увеличить первичное энергоснабжение. Для снижения выбросов CO₂ потребуются существенное увеличение доли безуглеродной, снижение вклада угольной и рост газовой составляющих потребления первичных энергоресурсов. При этом в число источников самых низких объемов выбросов CO₂, если учитывать выбросы в течение всего энергетического жизненного цикла входят ГЭС, АЭС и ветряные электростанции (ВЭС) [1].

Если рассматривать ГЭС с точки зрения возможности расширения их мощности, то основной потенциал сооружения ГЭС в регионах с удобным горным рельефом уже исчерпан, а строительство равнинных

ГЭС приводит к выводу из оборота значительных площадей земельных угодий. В настоящее время активно развивается строительство ВЭС, но с точки зрения надежности энергоснабжения у этих энергоисточников имеется существенный недостаток – зависимость от наличия и скорости ветра. Так, по данным АО «СО ЕЭС» [2] объем производства электроэнергии на ВЭС в 2019 г. составил 0,3 млрд. кВт*ч (увеличение относительно 2018 г. на 47,3%), но при этом коэффициент использования установленной мощности ВЭС составил всего 19,9% (для АЭС – 79,8%).

Ядерная энергетика выгодно отличается от других технологий в сфере энергетики в плане «интернализации» всех внешних издержек на этапах от безопасности до захоронения отходов и снятия с эксплуатации. «Интернализация» затрат означает то, что затраты во всей этой деятельности в значительной степени уже учтены в цене, которую мы платим за электроэнергию, выработанную на АЭС. Если бы экологические издержки, связанные с использованием

ем ископаемого (органического) топлива, были «интернализированы» в его цене, то цена, которую мы платим за электроэнергию, произведенную на основе ископаемого топлива, была бы значительно выше [3].

В настоящее время (на 30.03.2020) по данным МАГАТЭ в мире насчитывается 442 энергоблока АЭС общей мощностью около 390546 МВт. Ожидается, что к середине века доля атомной энергетики (АЭ) в общем объеме производства электроэнергии вырастет до 11,7 %.

Современная ядерная энергетика, использующая в подавляющем большинстве реакторы на тепловых нейтронах (РТН), имеет системные проблемы, к которым относятся непрерывное увеличение количества отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и радиоактивных отходов (РАО) (ближнесрочная проблема) и ограниченность топливной базы ввиду низкой эффективности полезного использования природного урана (дальнесрочная проблема) [1]. В существующих реакторах на тепловых нейтронах может использоваться только 1% урана (включая делящиеся и воспроизводящие изотопы), а в реакторах-размножителях на быстрых нейтронах - до 60%. Такие реакторы способны преобразовывать ^{238}U в делящийся ^{239}Pu интенсивнее, чем сами расходуют делящийся материал (свойство, называемое «размно-

жением»). Современное состояние с АЭ в России во многом схоже с мировой. Реакторы ВВЭР и РБМК составляют основу отечественной АЭ. В ближайшие десятилетия базой для наращивания АЭ будут АЭС с ВВЭР.

Рост потребности в энергии в развивающихся странах неизбежно приведет к существенному наращиванию атомных мощностей и к обострению проблемы накопления ОЯТ. Эта проблема при сохранении современного технологического уклада атомной энергетики будет отрицательно влиять на ее конкурентоспособность.

Сооружение АЭС российского дизайна за рубежом на привлекательных для развивающихся стран условиях полного обеспечения топливного цикла, включая возврат ОЯТ, дополнительно усугубляет эту проблему.

Перспективная крупномасштабная ядерная энергетика должна обладать гарантированной безопасностью, экономической устойчивостью и конкурентоспособностью, отсутствием ограничений по сырьевой базе на длительный период времени, экологической устойчивостью (малоотходностью). Этим условиям удовлетворяют ядерные энергетические системы с реакторами на быстрых нейтронах (РБН) с жидкометаллическим теплоносителем [4].

Список сокращений

АЭ	атомная энергетика
АЭС	атомная электростанция
БСР	быстрый свинцовый реактор
БГР	быстрый газовый реактор
ВАО	высокоактивные отходы
ВЭС	ветряная электростанция
ГЭС	гидроэлектростанция
ЖСР	жидкосолоевой реактор
ИРГ	инертные радиоактивные газы
МА	младшие актиниды
МАГАТЭ	Международное агентство по атомной энергии

1. Требования к перспективной ядерной энергетике

Мир сталкивается с новой комплексной проблемой поддержания экономической, экологической и энергетической безопасности для обеспечения долгосрочного развития человечества. Решение данной проблемы требует объединения усилий в поиске инновационных направлений технологического развития, обеспечивающих стабильное и обеспеченное будущее.

Ресурсная база традиционной АЭ ограничена запасами природного урана (в России ~700 тыс. тонн, в мире ~7 млн. тонн), в то время как работа современных АЭС должна быть обеспечена топливом на весь срок службы, который составляет 60-80 лет [5].

Соблюдение высоких стандартов безопасности является непременным условием для масштабного развития ядерной энергетики в XXI веке. Для АЭС

нового поколения должна полностью исключаться необходимость эвакуации населения в районе ее размещения при любых технически возможных авариях [6].

Требование малоотходности перспективной ядерной энергетики требует ее комплексного рассмотрения. Поэтому используемый термин «ядерная энергетическая система» (ЯЭС) подразумевает не только реакторную установку в составе АЭС, но и переработку (рециклирование) ядерного топлива.

В 2000 г. государства – члены МАГАТЭ признали, что для внедрения инноваций, обеспечивающих возможность того, чтобы ядерная энергетика способствовала устойчивому удовлетворению энергетических потребностей в XXI веке, необходимы скоординированные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы. В 2001 г. был создан форум GIF (the Generation IV International Forum). Хартия GIF была подписана в июле 2001 г. Аргентиной, Бразилией, Великобританией, Канадой, США, Франци-



ей, ЮАР, Ю. Кореей, Японией. Затем к ним присоединились Швейцария (2002), Евратом (2003), Россия, КНР (2006) и Австралия (2016). Рамочное соглашение GIF, регламентирующее его деятельность, было подписано 25.02.2005 г. сроком на 10 лет, в 2015 г. оно было продлено до 2025 г. Австралия подписала Рамочное соглашение МФП в сентябре 2017 года. Из 14 стран-членов МФП только 3 страны не подписали Рамочное соглашение МФП, оставаясь лишь формальными членами этой организации: Аргентина, Бразилия и Великобритания [7].

В 2002 г. по результатам рассмотрения более 100 различных проектов экспертами GIF были выбраны шесть реакторных технологий: быстрый натриевый реактор (РН); быстрый свинцовый реактор (БСР); быстрый газовый реактор (БГР); сверхкритический водяной реактор (СКВР); жидкосолевой реактор (ЖСР); сверхвысокотемпературный газовый реактор (СВТГР).

2. Методы и средства

2.1. Выбор технологии быстрых реакторов

Существуют два основных варианта обращения с ОЯТ: однократный цикл, при котором топливо используется только один раз (открытый ЯТЦ), после чего хранится как отходы, и многократный с переработкой ОЯТ и возвращением в цикл неиспользованного урана и накопленного плутония (замкнутый ЯТЦ). Развитие АЭ России при реализации открытого ЯТЦ приведет к дефициту природного урана примерно с 2055 г. (с учетом необходимости топливообеспечения АЭС российской дизайна за рубежом), резервированию значительного объема пунктов временного хранения ОЯТ, реализации дорогостоящей программы строительства объекта окончательной изоляции ВАО, постоянному росту оценочных обязательств (финансовое обременение) по ОЯТ (~300 млрд руб. к 2035 г.) [5].

Воспроизводство ядерного топлива является уникальным свойством ядерной энергетики. Это определяет перспективы её использования, т.к. значительно возрастают ресурсы ядерного топлива. В настоящее время это свойство используется слабо, поскольку есть доступные ресурсы урана.

При этом реакторная технология РН за счет избыточного нейтронного потенциала в активной зоне

дает возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива, а быстрый спектр нейтронов обеспечивает уникальные условия для выжигания младших актинидов (МА) и долгоживущих продуктов деления (ПД), наработки коммерческих изотопов (например, ^{60}Co с высокой удельной активностью).

В рамках Проектного соглашения GIF по системной интеграции и оценке РН проводится разработка проектных критериев безопасности и оценка концепций перспективных проектов РН на предмет их соответствия требованиям, предъявляемым к установкам 4-го поколения. В настоящее время заявлены на рассмотрение концепции реакторов JSFR (Япония); ESFR (европейский проект); KALIMER (Южная Корея); AFR-100 (США); БН-1200 (Россия). Планируется представление на рассмотрение концепции китайского CFR1200. Для каждой из перечисленных концепций РН странами-заявителями проведена их самооценка на предмет соответствия требованиям, предъявляемым к ЯЭС 4-го поколения, которые сформулированы в виде 26 метрик. Такой анализ соответствия проекта БН-1200, выполненный в 2018 г., показал согласованность с критериями безопасности для РН 4-го поколения, разработанными в рамках GIF [7].

В настоящее время в России ведутся исследования по нескольким вариантам нового ЯТЦ для решения вопросов ОЯТ и более эффективного использования урана: крупномасштабное развитие АЭ на быстрых реакторах с рециклированием регенерированного урана и плутония (рис. 1) [8]; так называемый цикл REMIX (топливо REMIX изготавливается из неразделенной смеси рециклированных урана и плутония, получаемого при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР) в тепловых реакторах при отсутствии РН в системе АЭ; двухкомпонентная ЯЭС, включающая тепловые и быстрые реакторы.

Как показывает сопоставительный анализ технико-экономических показателей сценарных вариантов развития ЯЭС, двухкомпонентная структура генерирующих мощностей на тепловых и быстрых реакторах, объединяемая замкнутым ЯТЦ, может обеспечить решение системных проблем ядерной энергетики (накопление ОЯТ, обращение с РАО) и кардинальное повышение эффективности использования природного урана [9].

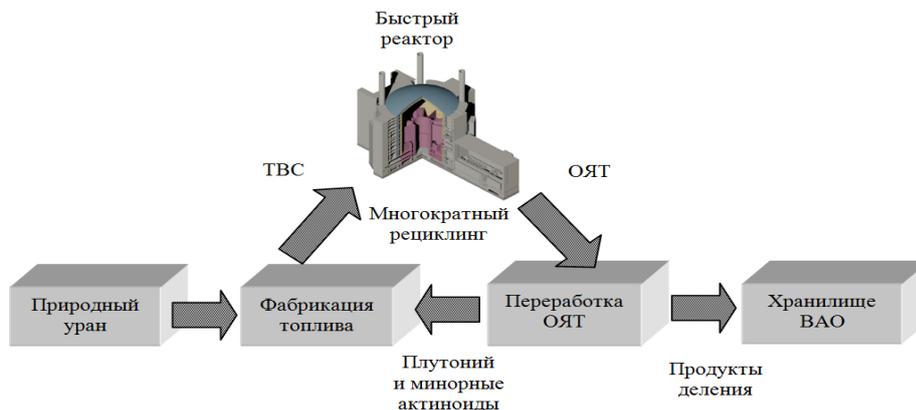


Рис. 1. Топливный цикл на основе быстрых реакторов.
Fig. 1. Fast reactor based fuel cycle.



2.2. Воздействие РБН на окружающую среду и персонал

АЭС с реакторами на быстрых нейтронах имеют термический коэффициент полезного действия более 40%, что значительно снижет тепловые выбросы в окружающую среду по сравнению с традиционными АЭС с «тепловыми» реакторами (коэффициент полезного действия – 31-33%) [10].

По данным Государственного доклада «О состоянии окружающей среды и влиянии факторов среды обитания на здоровье населения Свердловской обла-

сти» доля БАЭС в валовом объеме выбросов ЗВ в атмосферный воздух, сбросах ЗВ в водные объекты составляет сотые доли процента. При этом основными источниками выбросов (более 98% от всех источников АЭС) являются котельные, работающие на мазуте [11].

Выбросы радиоактивных веществ Белоярской АЭС в атмосферу обусловлены, в основном, инертными радиоактивными газами (ИРГ) и составляют, как правило, менее одного процента от допустимого значения (рис.2).

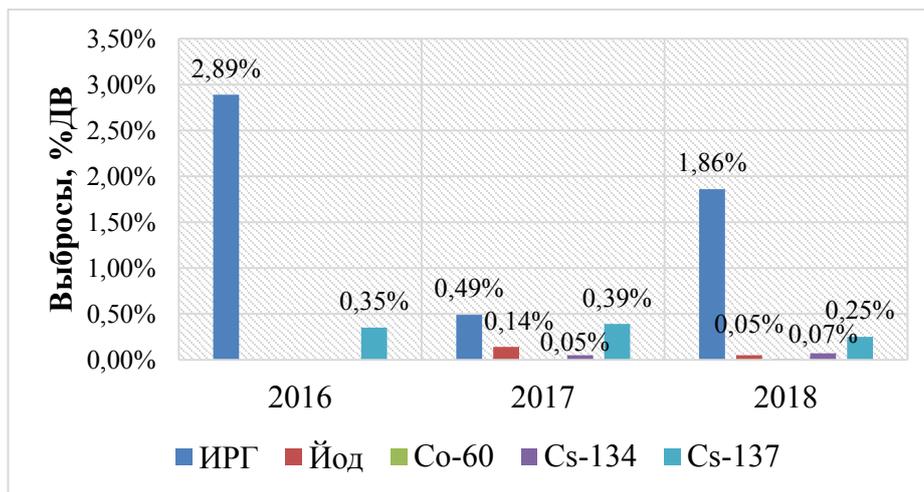


Рис. 2. Выбросы радионуклидов в атмосферу в 2016-2018 гг.
Fig. 2. Emissions of radionuclides into the atmosphere in 2016-2018.

Систематические измерения концентрации радиоактивных веществ в атмосферном воздухе, в водоемах-охладителях, измерения активности почвы и растительности, продуктов питания в контрольных точках подтверждают отсутствие влияния работы АЭС в режиме нормальной эксплуатации на состояние объектов внешней среды [12]. Радиационный риск для населения, проживающего в районе расположения БАЭС, находится в области

безусловно приемлемого риска, что не требует проведения дополнительных мероприятий по снижению активности радионуклидов в выбросах и сбросах АЭС.

Для энергоблока с реактором БН-600, который надежно и безопасно эксплуатируется уже 40 лет, достигнуты одни из наиболее низких уровней доз облучения [13], как в России, так и в мире (рис.3).

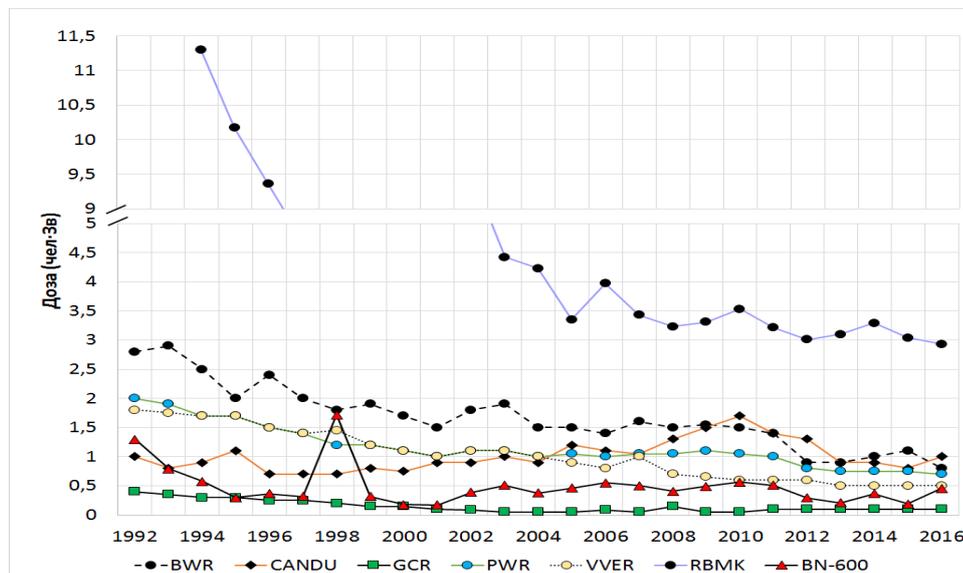


Рис. 3. Коллективные дозы облучения на АЭС с реакторами различных типов.
Fig. 3. Collective radiation doses at nuclear power plants with reactors of different types.



Во многом это определяется интегральной компоновкой, при которой все оборудование первого контура, контактирующее с радиоактивным натрием (за исключением системы очистки натрия первого контура), расположено в едином баке – корпусе ре-

актора [14]. В реакторе БН-1200 полностью исключены внешние системы с радиоактивным натрием, что дополнительно повышает его безопасность (рис.4)

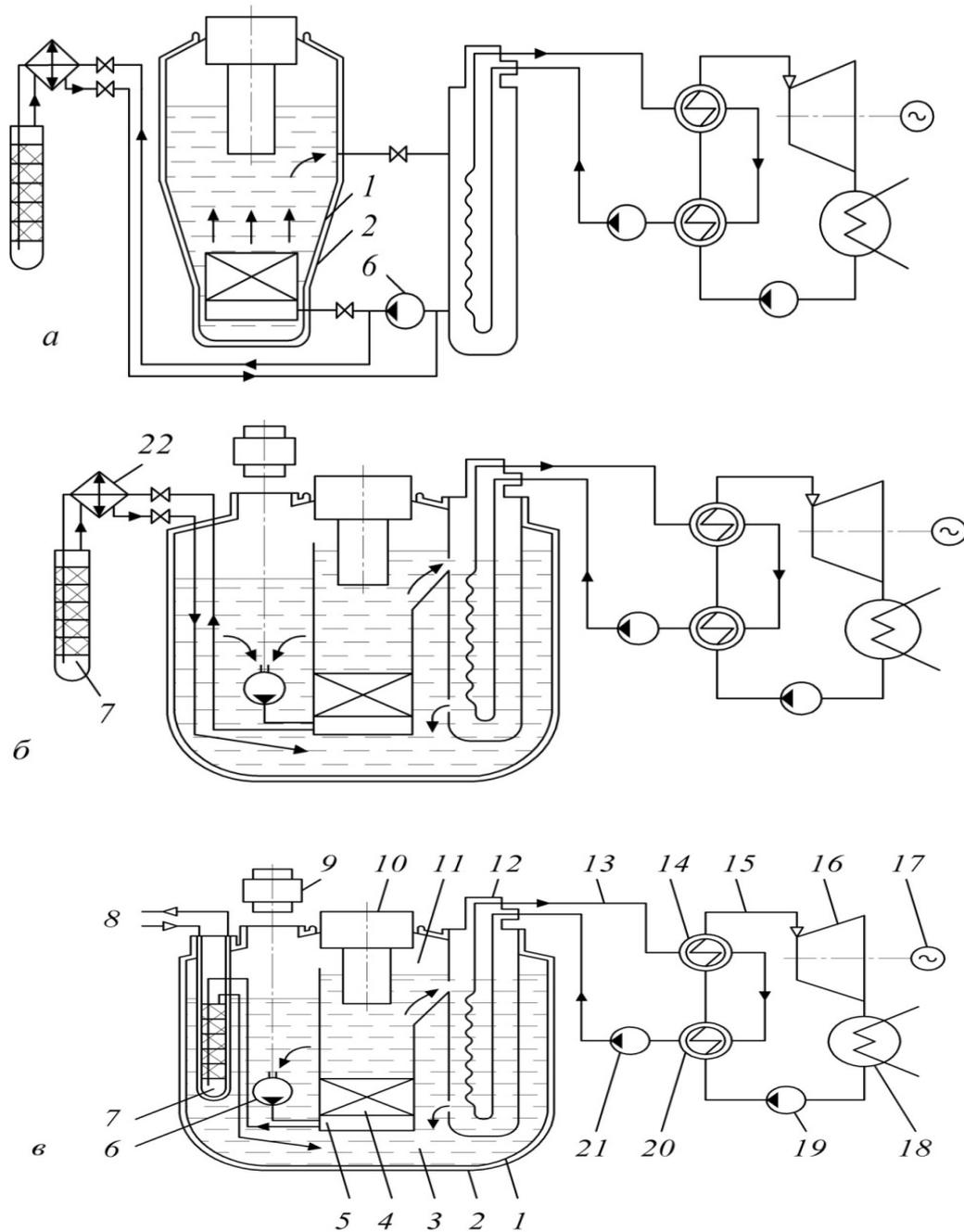


Рис. 4. Компоновки реакторов на быстрых нейтронах – петлевая (а) и интегральная с вынесенной (б) и внутрикорпусной (в) системами очистки натрия первого контура: 1 – основной корпус реактора; 2 – страховочный корпус; 3 – натрий первого контура; 4 – активная зона и зона воспроизводства; 5 – напорная камера; 6 – ГЦН первого контура; 7 – фильтр-ловушка системы очистки; 8 – система охлаждения фильтр-ловушки; 9 – электропривод ГЦН; 10 – поворотные пробки системы перегрузки; 11 – аргоновая подушка; 12 – ПТО; 13 – натрий второго контура; 14 – пароперегреватель парогенератора; 15 – перегретый пар; 16 – турбина; 17 – электрический генератор; 18 – основной конденсатор турбины; 19 – циркуляционный насос; 20 – испаритель парогенератора; 21 – ГЦН второго контура; 22 – рекуператор системы очистки натрия.

Fig. 4. The layouts of fast neutron reactors – loop type (a) and pool type with external (б) and internal (в) sodium purification systems: 1 - reactor pressure vessel; 2 - guard vessel; 3 - primary sodium coolant; 4 - reactor core and breeder blanket; 5 - pressure chamber; 6 - main circulation pumps of the primary circuit; 7 - cold filter trap of the sodium cleaning system; 8 - cold filter trap cooling system; 9 - electric drive of the main circulating pump; 10 - rotating plugs of the fuel reloading system; 11 - argon cavity; 12 - intermediate heat exchanger; 13 - secondary sodium; 14 - steam superheater; 15 - superheated steam; 16 - turbine; 17 - generator; 18 - main steam condenser; 19 - circulation pump; 20 - steam generator evaporator; 21 - secondary circulation pumps; 22 - heat exchanger of the sodium cleansing system.



3. Результаты и их обсуждение

Основой создания нового технологического уклада атомной энергетике – двухкомпонентной ядерно-энергетической системы с замкнутым ядерным топливным циклом – является современная атомная энергетика с тепловыми реакторами ВВЭР и имеющийся уникальный технологический опыт по быстрым натриевым реакторам БН с элементами замыкания ЯТЦ.

В настоящее время разработан проект реактора БН-1200, который может быть использован в ЯЭС четвертого поколения. Концепция энергоблока БН-1200 базируется на большом положительном опыте России в разработке и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. БН-1200 относится к реакторным установкам повышенной безопасности, благодаря оптимальному сочетанию референтных и новых решений, обеспечению высоких показателей безопасности, технико-экономических характеристик, возможности расширенного воспроизводства топлива. Вероятность тяжёлого повреждения активной зоны БН-1200 на порядок меньше требований нормативных документов. Санитарно-защитная зона (ССЗ) находится в границах промплощадки для любых проектных аварий [15]. Все системы с радиоактивным натрием размещены в пределах корпуса реактора, что исключает возможность его выхода в помещения реакторной установки из внешних коммуникаций (рис. 3, в). Уменьшение энергонапряженности активной зоны и увеличение выдержки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) во внутриреакторном хранилище до двух лет снизит удельное энерговыделение в топливе в три раза. Это повышает безопасность транспортировки и отмывки ОТВС от натрия перед их установкой в бассейн выдержки.

При замыкании ЯТЦ ЯЭС принципиальное значение имеет формирующийся изотопный состав рециклируемого плутония. Каждый рецикл плутония в тепловом реакторе ВВЭР приводит к ухудшению (деградации) его состава (снижается содержание «делящихся» изотопов ^{239}Pu , ^{241}Pu , увеличивается содержание «неделящихся» пороговых изотопов ^{240}Pu , ^{242}Pu). В то же время быстрый реактор БН-1200 сможет потреблять плутоний любого изотопного состава, а пороговые изотопы плутония в его спектре делятся с выделением энергии (хотя и не так интенсивно, как делящиеся изотопы). Кроме того, в быстром реакторе на МОКС-топливе идет интенсивная наработка делящегося ^{239}Pu из ^{238}U . За счет выгорания пороговых изотопов плутония и накопления ^{239}Pu непригодный для тепловых реакторов плутоний в быстром реакторе может быть изменен («облагорожен») до изотопного состава, пригодного для использования в тепловом реакторе [9].

Заключение

Как показывает анализ исследований ведущих российских и зарубежных специалистов, среди рас-

сматриваемых в настоящее время вариантов двухкомпонентной ЯЭС наиболее реалистичной является модель с использованием существующих технологий тепловых и быстрых реакторов, которые действуют в объединенном замкнутом ядерном топливном цикле. Она позволит решить в ближнесрочной перспективе проблемы накопления ОЯТ тепловых реакторов и избыточного выделенного плутония.

Среди основных предпосылок развития двухкомпонентной ЯЭС необходимо также выделить накопление экологических проблем, изменение климата, и значительную роль АЭ в развитии «Зеленой энергетики» и снижении выбросов CO_2 [16], [17].

Россия обладает многолетним опытом в области сооружения и эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. 40 и 5 лет на Белоярской АЭС надежно и безопасно эксплуатируются самые мощные в мире энергетические реакторы на быстрых нейтронах БН-600 и БН-800. Как показывает опыт эксплуатации, БН-600 и БН-800 являются одними из наиболее экологически чистых реакторов в мире.

На Белоярской АЭС готова площадка (рядом с блоком БН-800) под сооружение головного энергоблока БН-1200, есть возможность использования готовой строительной-монтажной базы, в том числе корпуса сборки реактора БН-800.

Важнейшим условием успешного развития технологии быстрых натриевых реакторов является наличие квалифицированного монтажного, эксплуатационного и ремонтного персонала, имеющего опыт в этой специфической области деятельности. В УрФУ, на кафедре «Атомные станции и ВИЭ», создана уникальная учебно-материальная база и высококвалифицированный профессорско-преподавательский состав для подготовки специалистов для эксплуатации и обслуживания реакторных установок типа БН-600 и БН-800 [18], [19], [20], [21].

Список литературы

1. Ташлыков, О.Л. Экологическое прогнозирование в ядерной энергетике XXI века / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 8-9 (172-173). – С. 50-58.
2. <https://minenergo.gov.ru/node/532>.
3. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710404_ru.pdf.
4. Tashlykov, O. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century / O. Tashlykov [et al.] // International journal of energy production and management. – 2016. – V. 1. – No. 2. – Pp. 133-140.
5. Алексеев С.В. Техничко-экономические аспекты инновационного развития ядерной энергетике России в XXI веке / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетике // Доклады XI международной конференции – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018, с. 460-462.
6. Новиков Г.А. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии: учебник /

Г.А. Новиков, О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин; под общ. ред. проф., д-ра техн. наук Г.А. Новикова. – Екатеринбург : Изд-во Урал. Ун-та, 2017. – 552 с.

7. Ашурко Ю.М. Инновационные реакторные технологии 4-го поколения и текущее состояние их развития в рамках международного форума «ПОКОЛЕНИЕ-IV» / Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики // Доклады XI международной конференции – Москва: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018. с.462-468.

8. Ташлыков О. Л. Основы ядерной энергетики / О.Л. Ташлыков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, – 2016. – 225 с.

9. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Техносфера, 2016. – 160 с.

10. Щеклеин С.Е. Повышение энергоэффективности АЭС / С.Е. Щеклеин, О.Л. Ташлыков, А.М. Дубинин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2015. – № 4. – С. 15-25.

11. Годовой отчет по экологической безопасности Белоярской АЭС (2018). – Режим доступа: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/2fd/2fd9823473ebf8ad2cc483d17f53dda0.pdf> – (Дата обращения: 05.04.2020).

12. Носов Ю.В. Обеспечение экологической безопасности при длительной эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах на примере Белоярской АЭС / Ю.В. Носов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №4. – С.64-68.

13. Ташлыков О.Л. О проблеме снижения дозовых затрат персонала АЭС / О.Л. Ташлыков [и др.] // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №1. – С.55-60.

14. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1 / под ред. С.Е.Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, – 2013. – 548 с.

15. Tashlykov O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle / O. Tashlykov [et al.] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – V. 190. – No. 2. – Pp. 907-918.

16. Ташлыков О.Л. Опыт атомного теплоснабжения города Заречного и перспективы атомной теплофикации Екатеринбурга / О.Л. Ташлыков, С.Е. Щеклеин // Российские регионы в фокусе перемен: сборник докладов XII Международной конференции.– Екатеринбург: Изд-во УМЦ УПИ, – 2018. – Том 2. – с.525-535.

17. Kostarev, V.S. The increasing of the energy efficiency of nuclear power plants with fast neutron reactors by utilizing waste heat using heat pumps / V.S. Kostarev, O.L. Tashlykov, V.A. Klimova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 06/2019, 552(1),012022.

18. Ташлыков О.Л. Ремонт оборудования атомных станций: учебник / О.Л. Ташлыков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та. – 2018. – 352 с.

19. Ташлыков О.Л. Парогенераторы АЭС: учебник / О.Л. Ташлыков, А.И. Бельтюков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, – 2019. – 304 с.

20. Прогноз и обеспечение потребности в специалистах для эксплуатации АЭС с реакторами типа БН (БН-600, БН-800, БН-1200) / Ташлыков О.Л. [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: тезисы докладов XI международной научно-технической конференции – М: АО «Концерн Росэнергоатом», 2018. С.250-251.

21. Ташлыков О. Л. АЭС: Продление ресурса и снятие с эксплуатации: учебник / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. - 216 с.

References

1. Tashlykov, O.L. Ehkologicheskoe prognozirovaniye v yadernoi ehnergetike XXI veka / O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein // Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya. – 2015. – № 8-9 (172-173). – S. 50-58.

2. <https://minenergo.gov.ru/node/532>.

3. https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull54-1/54104710404_ru.pdf.

4. Tashlykov, O. Ecological foresight in the nuclear power of XXI century / O. Tashlykov [et al.] // International journal of energy production and management. – 2016. – V. 1. – No. 2. – Pp. 133-140.

5. Alekseev S.V. Tekhniko-ehkonomicheskie aspekty innovatsionnogo razvitiya yadernoi ehnergetiki Ros-sii v XXI veke / Bezopasnost', ehffektivnost' i ehkonomika atomnoi ehnergetiki // Doklady XI mezhduna-rodnoi konferentsii – Moskva: AO «Kontsern Ros-ehnergoatom», 2018, s. 460-462.

6. Novikov G.A. Obespechenie bezopasnosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoi ehnergii: uchebnik / G.A. Novikov, O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein; pod obshch. red. prof., d-ra tekhn. nauk G.A. Novikova. – Ekaterinburg : Izd-vo Ural. Un-ta, 2017. – 552 s.

7. Ashurko YU.M. Innovatsionnye reaktornye tekhnologii 4-go pokoleniya i tekushchee sostoyanie ikh razvitiya v ramkakh mezhdunarodnogo foruma «POKOLENIE-IV» / Bezopasnost', ehffektivnost' i ehkonomika atomnoi ehnergetiki // Doklady XI mezhduna-rodnoi konferentsii – Moskva: AO «Kontsern Ros-ehnergoatom», 2018. s.462-468.

8. Tashlykov O. L. Osnovy yadernoi ehnergetiki / O.L. Tashlykov. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, – 2016. – 225 s.

9. Dvukhkomponentnaya yadernaya ehnergeticheskaya si-stema s teplovymi i bystryimi reaktormi v za-mknutom yadernom toplivnom tsikle / pod red. N.N. Ponomareva-Stepnogo. – М.: Tekhnosfera, 2016. – 160 s.

10. Shcheklein S.E. Povyshenie ehnergoehffektivnosti AEHS / S.E. Shcheklein, O.L. Tashlykov, A.M. Dubinin // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Yadernaya ehnergetika. – 2015. – № 4. – S. 15-25.



11. Godovoi otchet po ehkologicheskoi bezopasnosti Beloyarskoi AEHS (2018). – Rezhim dostupa: <https://www.rosenergoatom.ru/upload/iblock/2fd/2fd9823473ebf8ad2cc483d17f53dda0.pdf> – (Data obrashcheniya: 05.04.2020).

12. Nosov YU.V. Obespechenie ehkologicheskoi bez-opasnosti pri dlitel'noi ehkspluatatsii reaktorov na bystrykh neitronakh na primere Beloyarskoi AEHS / YU.V. Nosov [i dr.] // Al'ternativnaya ehnergetika i ehkologiya. – 2012. – №4. – S.64-68.

13. Tashlykov O.L. O probleme snizheniya dozovykh zatrat personala AEHS / O.L. Tashlykov [i dr.] // Izvestiya vuzov. Yadernaya ehnergetika. – 2011. – №1. – S.55-60.

14. Atomnye ehlektrostantsii s reaktorami na bystrykh neitronakh s natrievym teplonositelem: uchebnoe posobie. V 2 ch. CH. 1 / pod red. S.E.Shchekleina, O.L. Tashlykova. – Ekaterinburg: URFU, – 2013. – 548 s.

15. Tashlykov O. Ecological features of fast reactor nuclear power plants (NPPs) at all stages of their life cycle / O. Tashlykov [et al.] // WIT Transactions on Ecology and the Environment. – 2014. – V. 190. – No. 2. – Pr. 907-918.

16. Tashlykov O.L. Opyt atomnogo teplosnabzheniya goroda Zarechnogo i perspektivy atomnoi teplofikatsii Ekaterinburga / O.L. Tashlykov, S.E. Shcheklein

// Rossiiskie regiony v fokuse peremen: sbornik dokladov XII Mezhdunarodnoi konferentsii.– Ekaterinburg: Izd-vo UMTS UPI, – 2018. – Tom 2. – s.525-535.

17. Kostarev, V.S. The increasing of the energy efficiency of nuclear power plants with fast neutron reactors by utilizing waste heat using heat pumps / V.S. Kostarev, O.L. Tashlykov, V.A. Klimova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 06/2019, 552(1),012022.

18. Tashlykov O.L. Remont oborudovaniya atomnykh stantsii: uchebnyk / O.L. Tashlykov. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. Un-ta. – 2018. – 352 s.

19. Tashlykov O.L. Parogeneratory AEHS: uchebnyk / O.L. Tashlykov, A.I. Bel'tyukov. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, – 2019. – 304 s.

20. Prognoz i obespechenie potrebnosti v spetsialistakh dlya ehkspluatatsii AEHS s reaktorami tipa BN (BN-600, BN-800, BN-1200) / Tashlykov O.L. [i dr.] // Bezopasnost', ehffektivnost' i ehkonomika atomnoi ehnergetiki: tezisyy dokladov XI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii – M: AO «Kontsern Rosehnergoatom», 2018. S.250-251.

21. Tashlykov O. L. AEHS: Prodlenie resursa i snyatie s ehkspluatatsii: uchebnyk / O. L. Tashlykov. - Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2020. - 216 s.

Транслитерация по BSI



Морозы в Техасе привели к отключениям электричества у более 5 млн. жителей



Онсег, крупнейшая электроэнергетическая компания Техаса, обслуживающая 10 млн. абонентов, заявила, что перебои в электроснабжении приводят к гораздо более длительным отключениям электроэнергии, чем ожидалось изначально. Некоторые жители Далласа просидели без света как минимум восемь часов.

Совет по надежности электроснабжения Техаса (ERCOT) также предупредил, что будет продолжать краткосрочные непрерывные отключения электроэнергии по всему штату, поскольку спрос на нее превышает предложение. Из-за холодов и снегопада было потеряно около 30 тысяч МВт электроэнергии

По оценкам Energy Aspects Ltd, совокупная мощность приостановленных НПЗ составляет более 3 млн. б/с. В частности, о прекращении работ на НПЗ в Порт-Артуре (Техас) заявила Motiva Enterprises LLC, контролируемая Saudi Aramco. Также стало известно о приостановке работы техасских НПЗ Marathon Petroleum, Total и Exxon Mobil. В случае Exxon прекращение работы одного из НПЗ обусловлено не только морозами, но и недостаточными поставками газа.

По данным агентства Bloomberg, из-за сильных морозов добыча нефти в регионе сократилась на 1,5-1,7 млн. б/с, добыча газа — на 238 млн. кубометров.

Президент США Джо Байден еще в воскресенье ввел режим чрезвычайной ситуации в Техасе, что позволит выделить дополнительные ресурсы на помощь штату.

Операторы электросетей пока не могут сказать, когда закончатся блэкауты, поскольку, по прогнозам, морозы сохранятся до конца среды.

globalenergyprize.org

