

DOI: 10.18721/JEST.25401  
УДК 602.9

*Б.И. Нигматулин*

Институт проблем энергетики, г. Москва, Россия

## **АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В МИРЕ. СОСТОЯНИЕ И ПРОГНОЗ ДО 2050 ГОДА**

Рассмотрена ретроспектива строительства и подключения к сети энергоблоков АЭС в мире в период 1954–2018 гг. Дана оценка классификации аварий на АЭС и их влияние на развитие атомной энергетики. В том числе на динамику ввода энергоблоков АЭС. Представлена динамика электропроизводства на АЭС в мире в период 1970–2018 гг. Проанализированы разведанные и извлекаемые запасы, объемы добычи и потребности природного урана для электропроизводства на АЭС в мире. Составлен прогноз роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире до 2050 г, прогноза роста мирового электропроизводства на АЭС, а также, прогнозы роста мирового потребления урана и его разведанных запасов в 2016–2050 гг.

*Ключевые слова:* атомная энергетика, макроэкономика, электрогенерация, АЭС, генерирующие мощности, прогнозирование

*Ссылка при цитировании:*

Нигматулин Б.И. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 4. С. 6–22. DOI: 10.18721/JEST.25401

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

*B.I. Nigmatulin*

Institute of Energy Problems, Moscow, Russia

## **NUCLEAR INDUSTRY IN THE WORLD. STATE AND FORECAST UP TO 2050**

The stages (1970–2018), forecasts and prospects for development of the nuclear power industry in the world, in Russia and in other countries (2019–2050) are considered. The issues of nuclear fuel supply are analyzed. The paper presents an overview of construction and grid connection of nuclear power plants in the world in 1954–2018. We have given a classification for accidents at nuclear power plants and their impact on development of the nuclear industry is assessed. We have considered the dynamics of electricity generation at nuclear power units in 1970–2018, analyzing the explored and recoverable reserves, production volumes and the demand for natural uranium. We have composed a forecast for projected growth in total installed capacity of nuclear power units in the world up to 2050, a forecast for growth in global electricity generation at nuclear power plants, as well as forecasts for growth in global consumption of uranium and its proven reserves in 2016–2050.

*Keywords:* nuclear power engineering, macroeconomics, electric generation, NPP, generating power, forecasting

*Citation:*

B.I. Nigmatulin, Nuclear industry in the world. State and forecast up to 2050, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (04) (2019) 6–22. DOI: 10.18721/JEST.25401

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



**Введение.** С пуском Первой в мире АЭС в Обнинске в 1954 г. началось развитие гражданской атомной энергетики в России и в мире. В последующем ее развитие претерпело целый ряд драматических моментов, которые в первую очередь были связаны с крупномасштабными авариями на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.), Чернобыльской АЭС (СССР, Украина, 1986 г.) и АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.).

На первоначальном этапе (1960–1979 гг. и до 1986 г.) происходило бурное развитие атомной энергетики в мире, обсуждалась даже ее мессианская роль для будущего развития человечества как относительно дешевого, потенциально безграничного источника энергии. Считалось, что развитие атомной энергетики только на АЭС с реакторами на тепловых нейтронах будет ограничиваться недостаточным объемом извлекаемых запасов природного урана по доступной себестоимости. Так как в этих реакторах неэффективно используется энергия, запасенная в природном уране (всего около 1 %).

Это стимулировало во многих странах разработку технологий замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) с реакторами на быстрых нейтронах (РБН), в первую очередь охлаждаемых натрием. В этих реакторах использование энергии, запасенной в природном уране, увеличивается в 50 раз. В СССР и во Франции были построены опытно-промышленные АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

На втором этапе (1980–1990 гг. и до 2011 г.), после аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.), Чернобыльской АЭС (СССР, Украина, 1986 г.), вопросы безопасности АЭС стали главными проблемами, ограничившими развитие атомной энергетики. Во многих странах, включая Советский Союз, кардинально изменилось общественное мнение в вопросе атомной энергетики. Возникли массовые экологические движения, выступившие против строительства АЭС. Как следствие, ужесточились требования к их безопасности. Соответственно, произошло существенное усложнение проектов

АЭС и удорожание их строительства. Кроме того, с внедрением парогазового цикла, заметно повысилась конкурентоспособность газовых ТЭС (ПГУ с КПД до 55–60 %) по сравнению с традиционным паротурбинным циклом (с КПД до 38–40 %), а также в период 1986 – 2005 гг. и повторно после 2011 г. в 1,5–2,5 раза снизилась цена газа. В развитых странах прекратился рост электропотребления и соответствующий рост электропроизводства. В результате произошло резкое замедление развития атомной энергетики по сравнению с первым этапом. При этом заметно выросли извлекаемые запасы природного урана в мире по приемлемой себестоимости, позволяющей обеспечить развитие атомной энергетики с реакторами на тепловых нейтронах на обозримое будущее. Появилось понимание того, что коммерческое развитие ЗЯТЦ с РБН ограничивается только ядерными державами и экономически неконкурентоспособно.

Третий этап начался после аварии на АЭС «Фукусима-1», (Япония, 2011 г.). Его можно назвать «постфукусимским этапом развития мировой атомной энергетики». Этот этап характеризуется «замораживанием» или сокращением производства электроэнергии на АЭС в развитых странах из-за массового снятия с эксплуатации энергоблоков АЭС, достигших предельного срока службы, и замещением доли АЭС в энергобалансе этих стран на ТЭС с ПГУ и ВИЭ, конкурентоспособность которых будет только возрастать. Для ТЭС с ПГУ это связано с внедрением новых технологий и сохранением низкой цены газа на достаточно длительный срок. Для ВИЭ — это непрерывное внедрение новых технологий и соответствующее удешевление электропроизводства. Само строительство новых энергоблоков АЭС в различных странах будет ограничиваться недостатком инвестиций в их капиталоемкие проекты, длительным периодом согласования регулируемыми органами. Для повышения конкурентоспособности АЭС требуется существенное упрощение и удешевление собствен-

но проектов, в первую очередь реакторного отделения (ядерного острова), стоимости оборудования энергоблока, строительства и монтажа на площадке, а на стадии эксплуатации — снижение операционных затрат и стоимости ядерного топлива. На данный момент в мире отсутствуют технологии, которые обещают переломить тенденцию к дальнейшему росту удельных капитальных вложений и, соответственно, стоимости производства электроэнергии на АЭС. Российские же проекты (ВВЭР-ТОИ) уступают примерно на 20–30 % по удельным капитальным вложениям на установленный 1 кВт мощности перспективным проектам конкурентов из США, Китая (AP1000 и ESBWR) и Республики Корея (PWR APR-1400).

В этих условиях ожидать серьезного роста мировой атомной энергетики не приходится. Наиболее вероятным является продолжение снижения доли атомной энергетики в мировом энергетическом балансе. Соответственно, проблема топливообеспечения, представлявшаяся основной проблемой на первом этапе, теряет свою актуальность. **Открытый ЯТЦ с ЛВР практически применяется и будет применяться в мире до тех пор, пока ЗЯТЦ не станет экономически выгодным.** Однако для существующего уровня мирового электропроизводства на АЭС извлекаемых запасов природного урана хватит минимум на **100–130 лет** (в зависимости от себестоимости добычи). При оптимистическом (максимальном) прогнозе роста электропроизводства на АЭС в период 2016–2050 гг. извлекаемых запасов природного урана хватит минимум на **60–80 лет**. Причем это без учета роста разведанных запасов и новых технологий добычи (например, из морской воды), а судя по опыту прогнозирования в недавнем прошлом «исчерпания газовых и нефтяных резервов», можно предположить, что новые запасы природного урана так или иначе будут найдены.

Основными драйверами развития атомной энергетики в мире на «постфукусимском» этапе становятся развивающиеся страны, в

первую очередь Китай, Индия, а также страны, имеющие ограниченные запасы ископаемых энергоресурсов и программы замещения «грязных» (угольных) энерготехнологий на чистые. В настоящее время перед Китаем остро встали экологические проблемы, в первую очередь вызванные вредными выбросами с угольных ТЭС, на которых производится почти 75 % электроэнергии в стране. Прогнозируется, что уже к 2035 г. доля электропроизводства на «чистых» энергоисточниках (ГЭС, ПГУ, АЭС и ВИЭ) составит более 50 %. При этом заметную роль в стране станет играть атомная энергетика с долей 12,1 %, которая к 2050 г. увеличится до 18,1 %. Именно к этому времени в Китае накопятся достаточные запасы облученного ядерного топлива (ОЯТ) и возникнет вопрос, что с ними делать. Одним из путей решения может стать ЗЯТЦ с РБН который Китай развивает самостоятельно, после того как в 2010 г. при техническом содействии России был пущен исследовательский реактор CEFR типа БН тепловой мощностью 65 МВт. Похожая ситуация складывается и в Индии, которая успешно разрабатывает собственную технологию РБН с натриевым теплоносителем. При этом широкая коммерческая реализация ЗЯТЦ с РБН **невозможна вне ядерных держав**, так как технологически всегда можно получить оружейный плутоний в процессе переработки топлива. Что касается ЗЯТЦ с РБН со свинцовым теплоносителем (проект «Прорыв»), то помимо неизвестных экономических параметров и невозможности широкой коммерциализации, технология свинцового теплоносителя не была продемонстрирована на каком-либо реакторе. В этих условиях строительство АЭС сразу значительной тепловой мощностью 700 МВт (300 МВт электрической) и завода по переработке облученного ядерного топлива (ОЯТ) является неоправданным.

Итак, можно констатировать, что в обозримом будущем (до 2050 г.) развитие мировой



атомной энергетики будет однокомпонентно, то есть базироваться на ядерных реакторах на тепловых нейтронах. И только через 20–30 лет технология ЗЯТЦ с РБН, возможно, будет востребована в некоторых ядерных странах, развивающих крупномасштабно атомную энергетику. Если, конечно, будет действительно создана работоспособная технология ЗЯТЦ. Кстати, за все время существования атомной энергетики (с середины 1950-х гг.) ее пока так и не удалось создать.

С пуском первой в мире АЭС в Обнинске в 1954 г. началось развитие атомной энергетики в России и в мире.

**1. Строительство и подключение к сети энергоблоков АЭС в мире в период 1954–2018 гг.** На рис. 1 показано количество энергоблоков

АЭС, ежегодно подключаемых к сети и находящихся в стадии строительства в мире в период 1954–2018 гг. (из информационной системы МАГАТЭ [1])

Из рис. 1 видно, что массовое строительство энергоблоков АЭС началось с конца 1950-х гг. До середины 1960-х гг. количество энергоблоков, начатых к строительству в год, находилось на уровне 10 и ниже. С середины 1960-х гг. и до конца 1980-х гг. это количество варьировалось от 13 (в 1969 г.) до 43 (в 1976 г.). С начала 1980-х гг. и до начала 1990-х гг. оно снизилось с 20 (в 1980 г.) до 5 (в 1990 г.). С начала 1990-х и до середины 2000-х гг. это количество варьировалось от 0 (в 1995 г.) до 7 (в 2000 г.). С середины 2000-х гг. по настоящее время оно варьировалось от 3 (в 2014 г. и 2016 г.) до 16 (в 2010 г.).

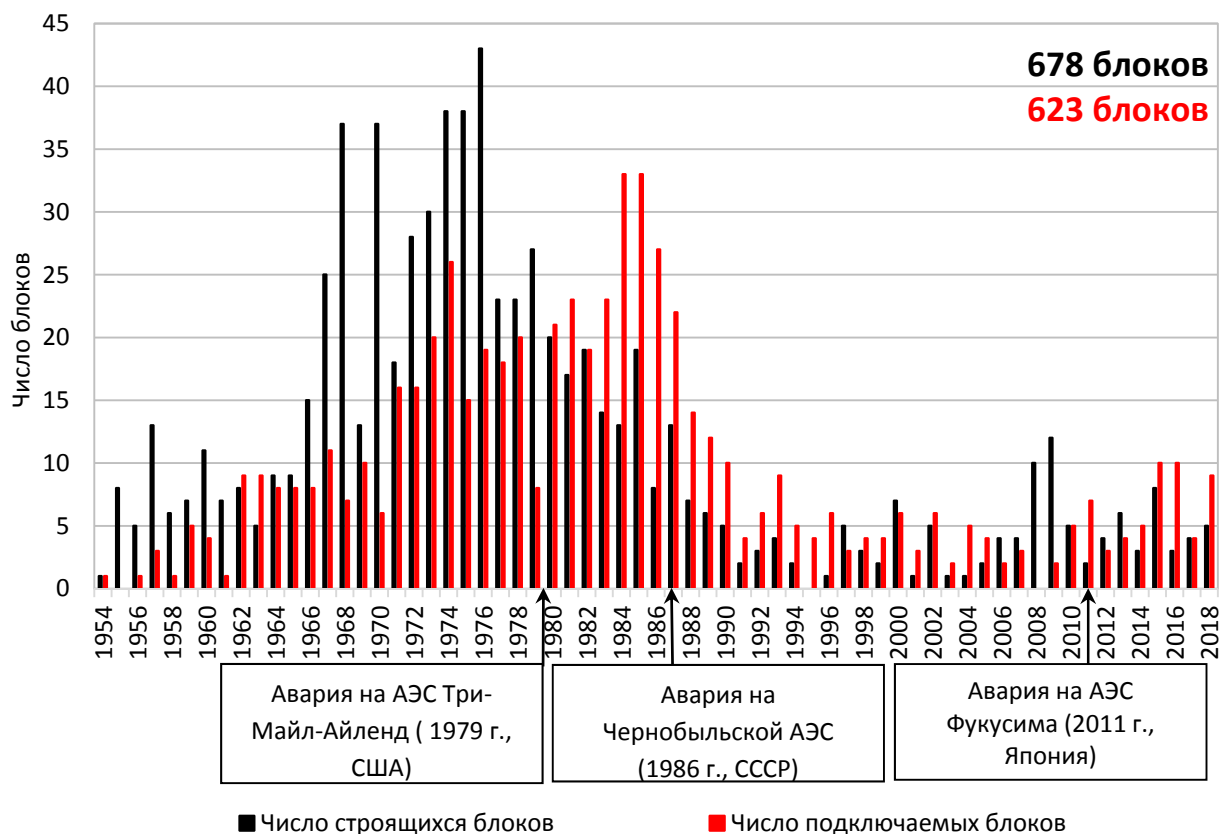


Рис. 1. Количество энергоблоков АЭС, подключенных к сети и находящихся в стадии строительства в мире в период 1954–2018 гг.

Fig. 1. The number of nuclear power units connected to the network and under construction in the world in the period 1954–2018.

Количество энергоблоков, подключаемых ежегодно к сети, достигло 11 в период с 1962 по 1970 г. В период 1970–1980-х гг. это количество изменялось от 6 энергоблоков в 1970 г. до 26 в 1974 г. С середины 1980-х гг. по 1990 г. оно изменялось от 10 энергоблоков в 1990 г. до 33 в 1984–1985 гг. В период 1991–2015 гг. (по настоящее время) оно снизилось от 2 блоков в 2006 и 2009 гг. и 10 блоков в 2015 г.

В мире в период 1954–2018 гг. (65 лет) общее количество энергоблоков АЭС, начатых к строительству, равнялось **678**, а количество подключенных к сети – **623**. Таким образом, в этот период **55** энергоблоков из стадии строительства не были доведены до подключения к сети, что составило **8 %** от общего числа начатых к строительству. Большинство остановок в строительстве энергоблоков, произошло из-за крупномасштабных аварий на АЭС, в первую очередь на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979 г.), Чернобыльской АЭС (СССР, Украина, 1986 г.) и АЭС «Фукусима-1», (Япония, 2011 г.). Они оказали **определяющее** негативное влияние на развитие атомной энергетики в мире, особенно авария на Чернобыльской АЭС. На территории бывшего СССР (Россия, Украина, Литва, Белоруссия, Армения) было остановлено строительство более 30 энергоблоков АЭС, которые составляют основную долю из 55 энергоблоков, недоведённых до подключения к сети в мире.

**2. Аварии на АЭС и их классификации. Влияние на развитие атомной энергетики.** Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) в 1988 г. разработало международную шкалу ядерных событий (INES, International Nuclear Event Scale). Эта шкала, начиная с 1990 г. используется в целях единообразия оценки чрезвычайных случаев, связанных с аварийными радиационными выбросами в окружающую среду на атомных станциях, а позднее стала применяться ко всем установ-

кам, связанным с гражданской атомной промышленностью.

По шкале INES ядерные и радиологические аварии и инциденты классифицируются 7 уровнями.

В настоящее время две аварии оценены по максимальному, **7-му** уровню: авария на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и авария на АЭС «Фукусима-1» (2011 г.), одна по **6-му**: авария на ПО «Маяк» (1957 г.) и две по **5-му**: авария на АЭС «Три-Майл-Айленд» (1979 г.) и авария в Уиндскейле (1957 г.).

**3. Динамика установленных мощностей энергоблоков АЭС, ежегодно подключаемых к сети в мире, в период 1954–2018 гг. Влияние аварий на АЭС.** На рис. 2 показаны установленные мощности энергоблоков АЭС, ежегодно подключаемых к сети, и динамика установленной мощности АЭС в мире в период с 1954 г. по 2018 г., по данным IAEA Nuclear Power Reactors in the World, 2018

Из рис. 2 видно, что в период с 1970 по 1979 г. (год аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд», США) в мире было введено в эксплуатацию 164 энергоблоков суммарной мощностью 113 ГВт. А в период 1980–1990 гг. еще 255 энергоблоков суммарной мощностью 216 ГВт. Итого в период с 1970 по 1990 г. (**21 год**) в мире был введен в эксплуатацию 419 энергоблоков АЭС суммарной мощностью 329 ГВт.

В следующие 21 год (1991–2011 гг.) в мире было введено в эксплуатацию 90 энергоблоков суммарной мощностью 75 ГВт. Такое резкое снижение количества подключенных к сети энергоблоков АЭС произошло после аварии на Чернобыльской АЭС (СССР, Украина) в 1986 г. В результате в период 1991–2011 гг., по сравнению с периодом 1970–1990 гг., было подключено к сети в **4,7 раза** меньшее количество энергоблоков АЭС и, соответственно, в **4,4 раза** меньшей суммарной установленной мощности.

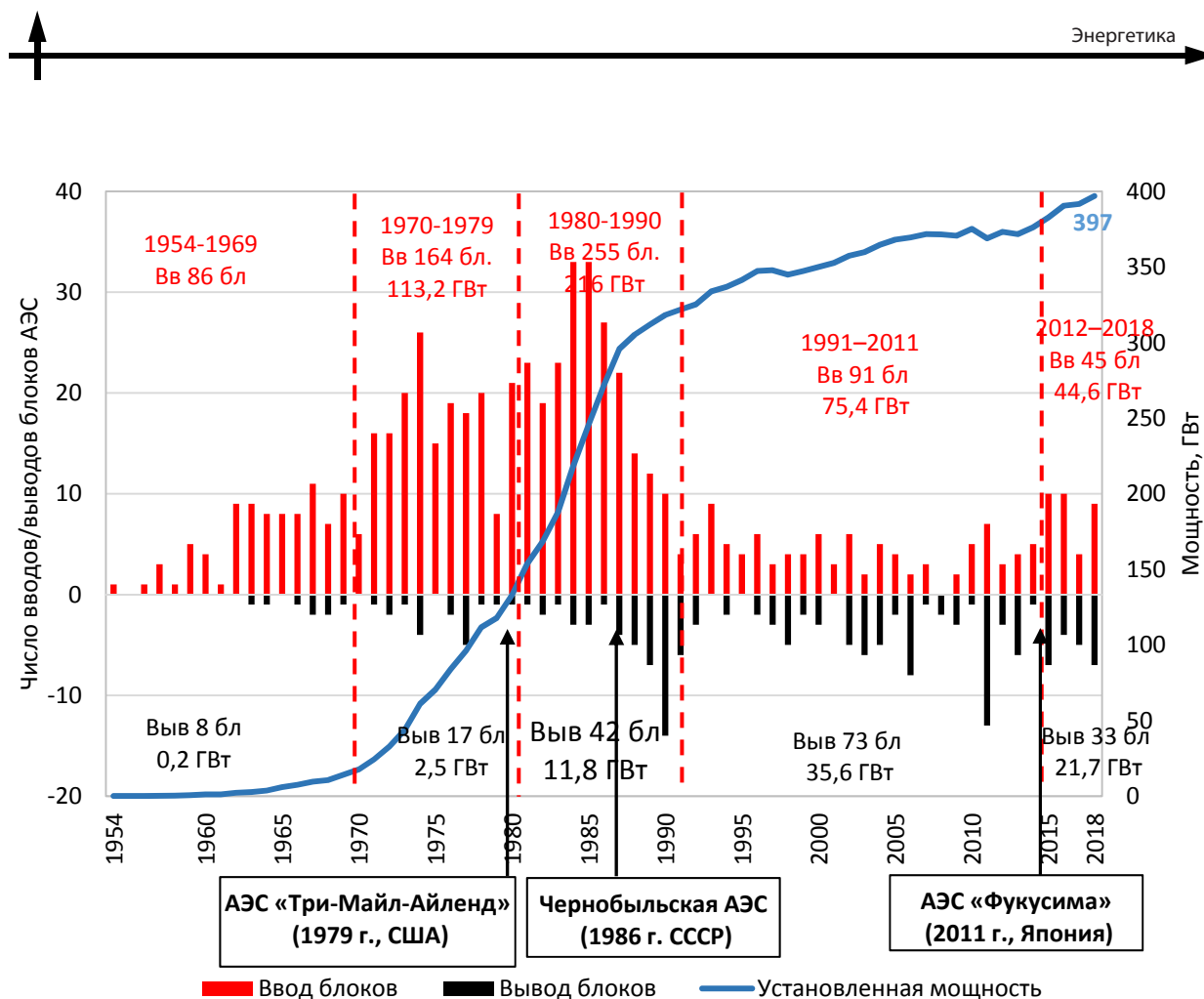


Рис. 2. Установленные мощности энергоблоков АЭС, ежегодно подключаемых к сети, и динамика установленной мощности АЭС в мире, в период 1954–2018 гг.

Fig. 2. Installed capacity of nuclear power units annually connected to the network, and the dynamics of the installed capacity of nuclear power plants in the world, in the period 1954–2018.

За последние семь лет (2012–2018 гг.), количество подключенных к сети энергоблоков АЭС составило 45, суммарной установленной мощностью 44,6 ГВт.

На рис. 3 показано количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации в мире, и их установленная мощность по годам в период 1954–2018 гг. (из информационной системы МАГАТЭ [1]).

Из рис. 3 видно, что с конца 1950 г. до 1987 г. (30 лет) количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации, и их установленная мощность ежегодно росла почти экспоненциально. В результате, за этот период, количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации, увеличилось

с 15 до 407, или в 27 раз, а их установленная мощность с 11 до 296 ГВт, или также в 27 раз.

После аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), в период 1988–2018 гг. (30 лет), количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации, увеличилось с 416 до 450, или всего на 7,9 %, а их установленная мощность с 305 до 397 ГВт, или на 30 %. В этот период наблюдался рост единичной мощности энергоблоков АЭС (до 1,45 ГВт).

Отсюда следует, что авария на Чернобыльской АЭС чрезвычайно негативно повлияла на развитие атомной энергетики в мире, вызвав резкое снижение темпов ввода в эксплуатацию новых энергоблоков АЭС.

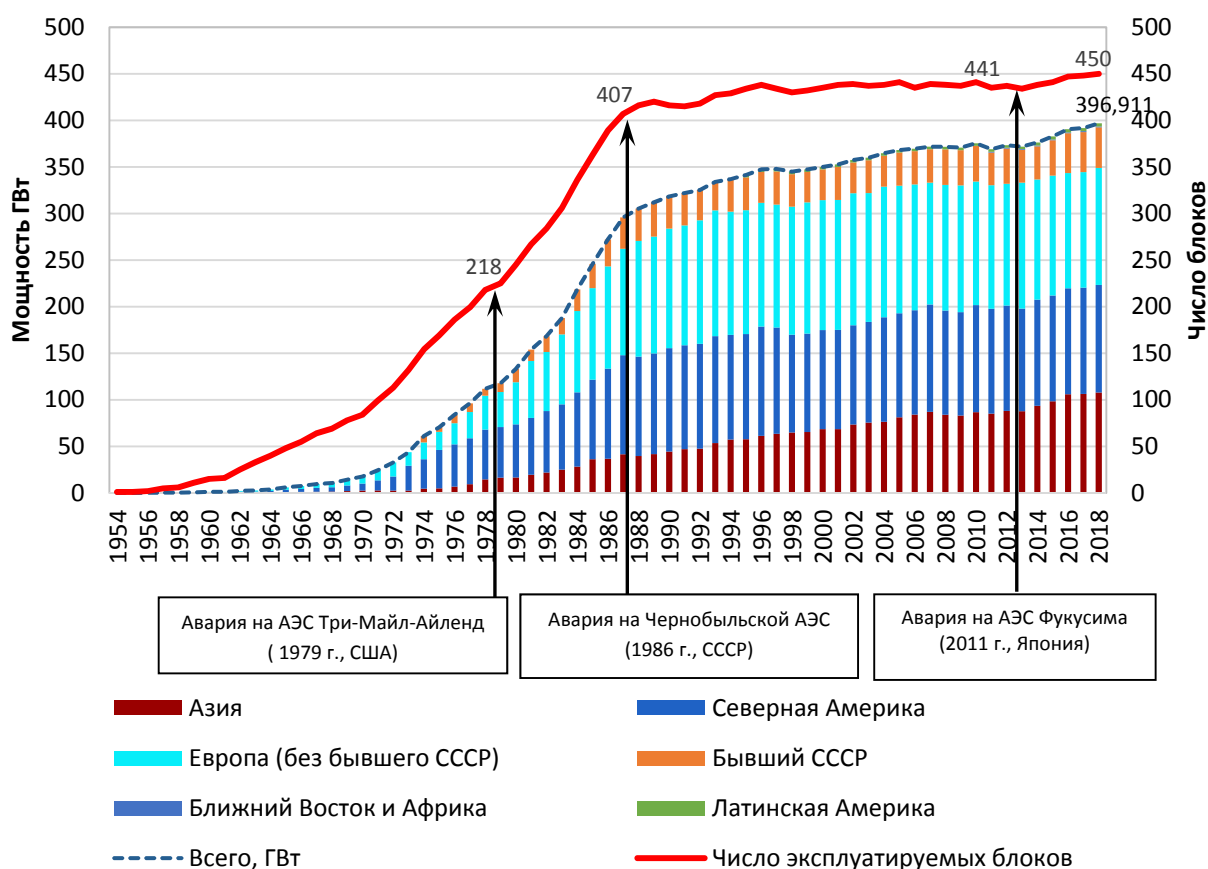


Рис. 3. Количество энергоблоков АЭС, находившихся в эксплуатации в мире, и их установленная мощность по годам, в период 1954–2018 гг.

Fig. 3. The number of nuclear power units in operation in the world, and their installed capacity by years, in the period 1954–2018.

После аварии на Чернобыльской АЭС ситуация с развитием атомной энергетики в мире усугубилась еще и тем, что с середины 1980-х гг. до начала нулевых существенно снизилась цена природного газа, основного энергоносителя для тепловых электростанций (ТЭС) во многих странах (см. рис. 10, раздел 1.7).

**4. Электропроизводство на АЭС в мире в период 1971–2017 гг.** На рост электропроизводства на АЭС влияют два фактора: рост установленных мощностей АЭС, подключенных к сети, и коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) АЭС.

На рис. 4 показаны динамика электропроизводства на АЭС с начала массового подклю-

чения энергоблоков АЭС к сети, а также его доля в общем электропроизводстве в мире в период 1971–2018 гг. [2].

Из рис. 4 видно, что в мире в период 1971–1988 гг. (**18 лет**) электропроизводство на АЭС выросло с уровня около 100 до 1900 млрд кВт·ч, и этот рост был близок к экспоненциальному. Соответственно, доля электропроизводства на АЭС в общем электропроизводстве в мире выросла практически линейно с 2 до 17 %.

В период 1989–2000 гг. (**12 лет**) происходил линейный рост электропроизводства на АЭС с 2000 млрд кВт·ч до 2600 млрд кВт·ч (**в 1,3 раза**). Это соответствовало примерно постоянной его доле в общем объеме электропроизводства в мире (16,7–17,6 %). После 2000 г. до настоящего

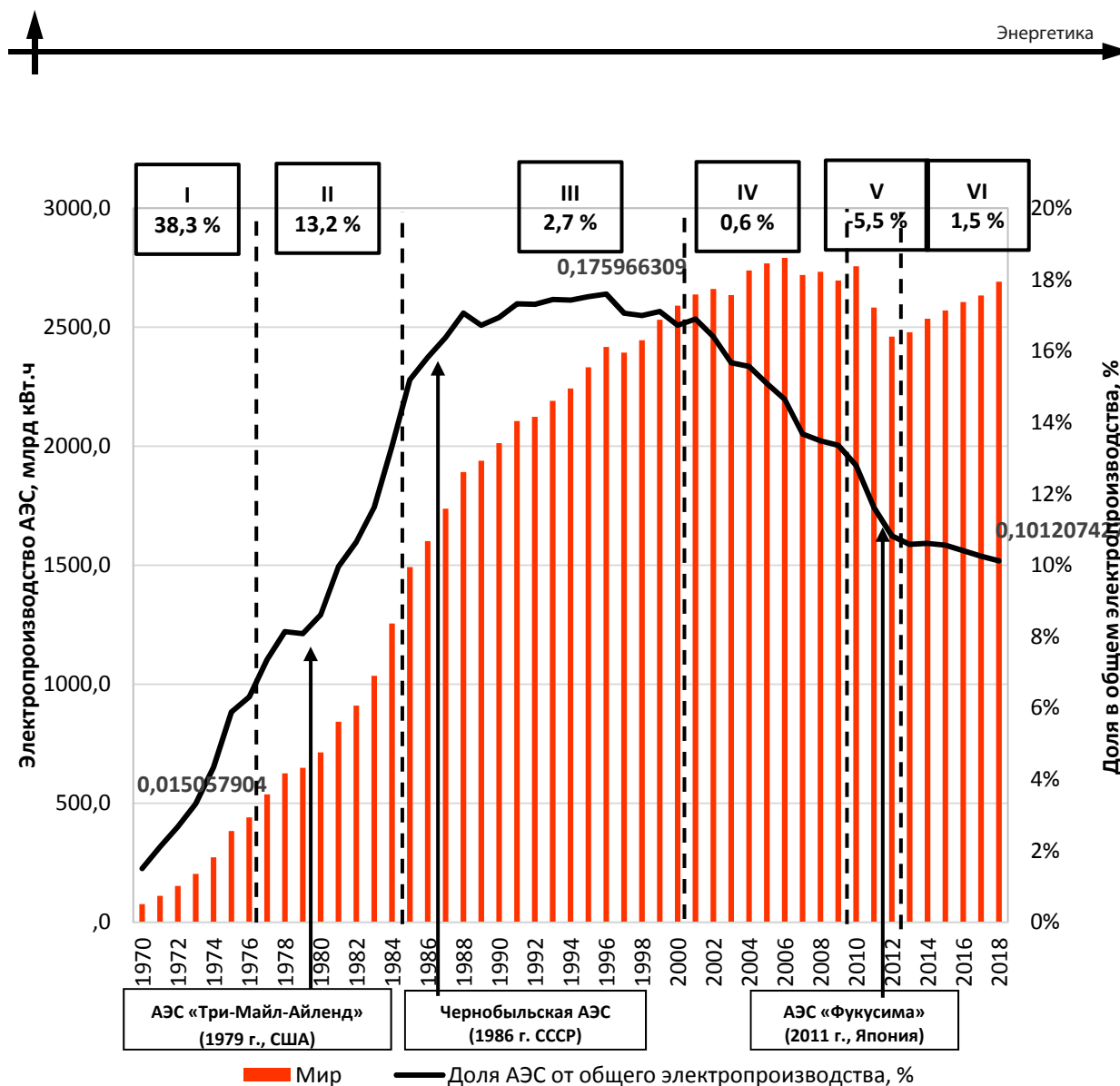


Рис. 4. Динамика электропроизводства на АЭС и его доли в общем электропроизводстве в мире в период 1971–2018 гг.

Fig. 4. The dynamics of electric production at nuclear power plants and its share in the total electric production in the world in the period 1971–2018.

времени (**19 лет**) объем электропроизводства на АЭС стагнировал и находится на уровне около 2400–2600 млрд кВт·ч. При этом его доля в общем объеме электропроизводства в мире линейно снижалась с 16,5 % (2000 г.) до 10 % в 2013 г., а далее оставалась на этом уровне до настоящего времени [3].

На рис. 5 показаны ежегодные и среднегодовые темпы роста электропроизводства на АЭС в мире в период 1971–2018 гг.

Из рис. 5 видно, что в мире весь период 1971–2018 гг. по уровню среднегодовых тем-

пов роста электропроизводства на АЭС можно разделить на 6 диапазонов:

I – 1971–1975 гг., очень высокий среднегодовой темп роста, равный 38,3 %;

II – 1976–1989 гг., высокий среднегодовой темп роста, равный 13,2 %

III – 1990–2000 гг., умеренный среднегодовой темп роста, равный 2,7 % Он приблизительно совпадал со среднегодовым темпом роста общего электропроизводства в мире;

IV – 2001–2010 гг., околонулевой среднегодовой темп роста;



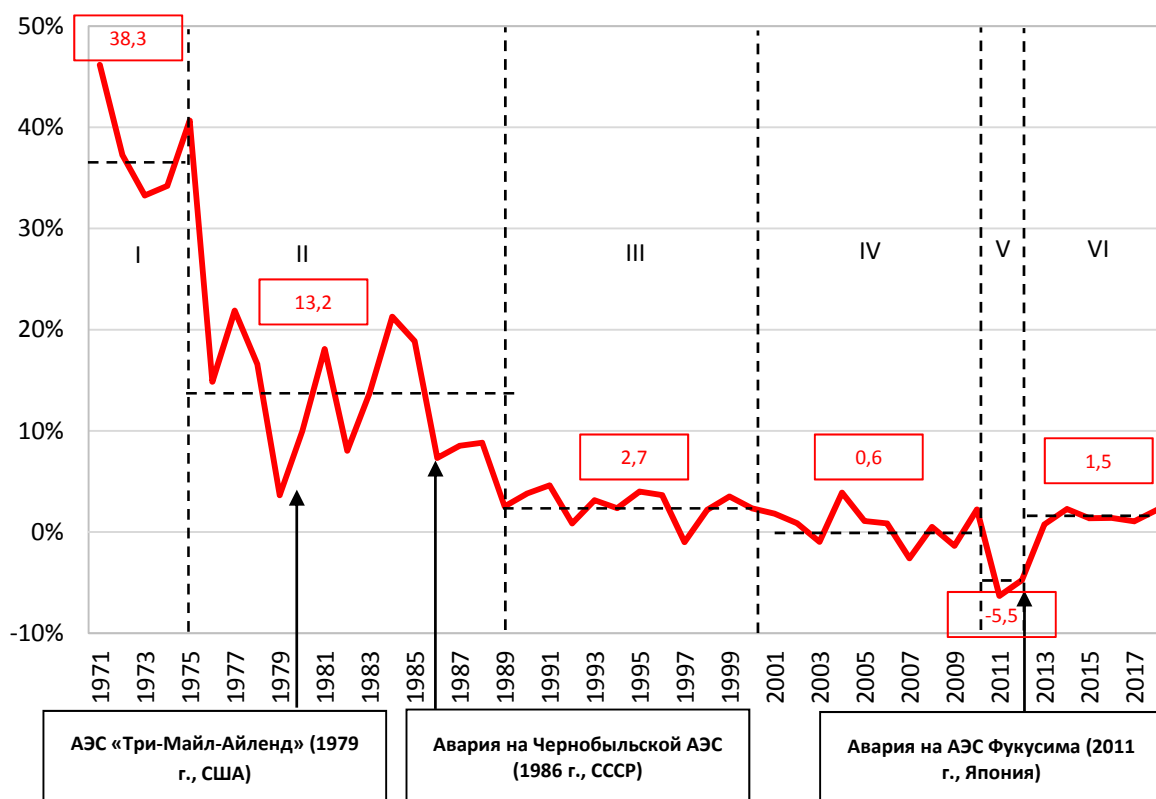


Рис. 5. Ежегодные темпы роста электропроизводства на АЭС в мире в период 1971–2018 гг.

Fig. 5. The annual growth rate of electric production at nuclear power plants in the world in the period 1971–2018.

V – 2011–2012 гг., отрицательный среднегодовой темп роста  $-5,5\%$ , последствия аварии на АЭС «Фукусима-1»;

VI – 2013–2018 гг., низкий среднегодовой темп роста, равный  $1,5\%$ .

Из рис. 5 видно, что в период 1976–1989 гг. (до аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и после, с лагом 3 года) среднегодовой темп роста электропроизводства на АЭС равнялся  $13,2\%$ . После этой аварии, в период 1990–2000 гг. (11 лет), он снизился до  $2,7\%$ , или в 5 раз. В период 2001–2010 гг. (10 лет) он был около нулевым.

После аварии на АЭС «Фукусима-1» (2011–2012 гг.) среднегодовой темп роста электропроизводства на АЭС стал отрицательным ( $-5,5\%$ ). При этом темп роста производства электроэнергии на АЭС в мире упал с  $3\%$  в 2010 г. до  $-6\%$  в 2011 г. и  $-5\%$  в 2012 г. В постфукусимском периоде 2013–2018 гг. этот темп вышел на уровень  $1,5\%$ .

Отсюда видно, какое негативное влияние оказали тяжелые аварии на АЭС в мире на их среднегодовые темпы электропроизводства.

**5. Разведанные и извлекаемые запасы, объемы добычи и потребности природного урана для электропроизводства на АЭС в мире по годам, в период 1949–2017 гг.** Для электропроизводства на АЭС используется уран с обогащением по изотопу  $^{235}\text{U}$  до  $5\%$ . Поэтому важно определить соотношение между извлекаемыми запасами природного урана, объемами его добычи и потребности для электропроизводства на АЭС в мире.

На рис. 6 показан рост извлекаемых запасов природного урана (ранжированные по уровню себестоимости его добычи) по годам, в период 1975–2017 гг., по данным World Nuclear Association (декабрь, 2018 г.) [4].

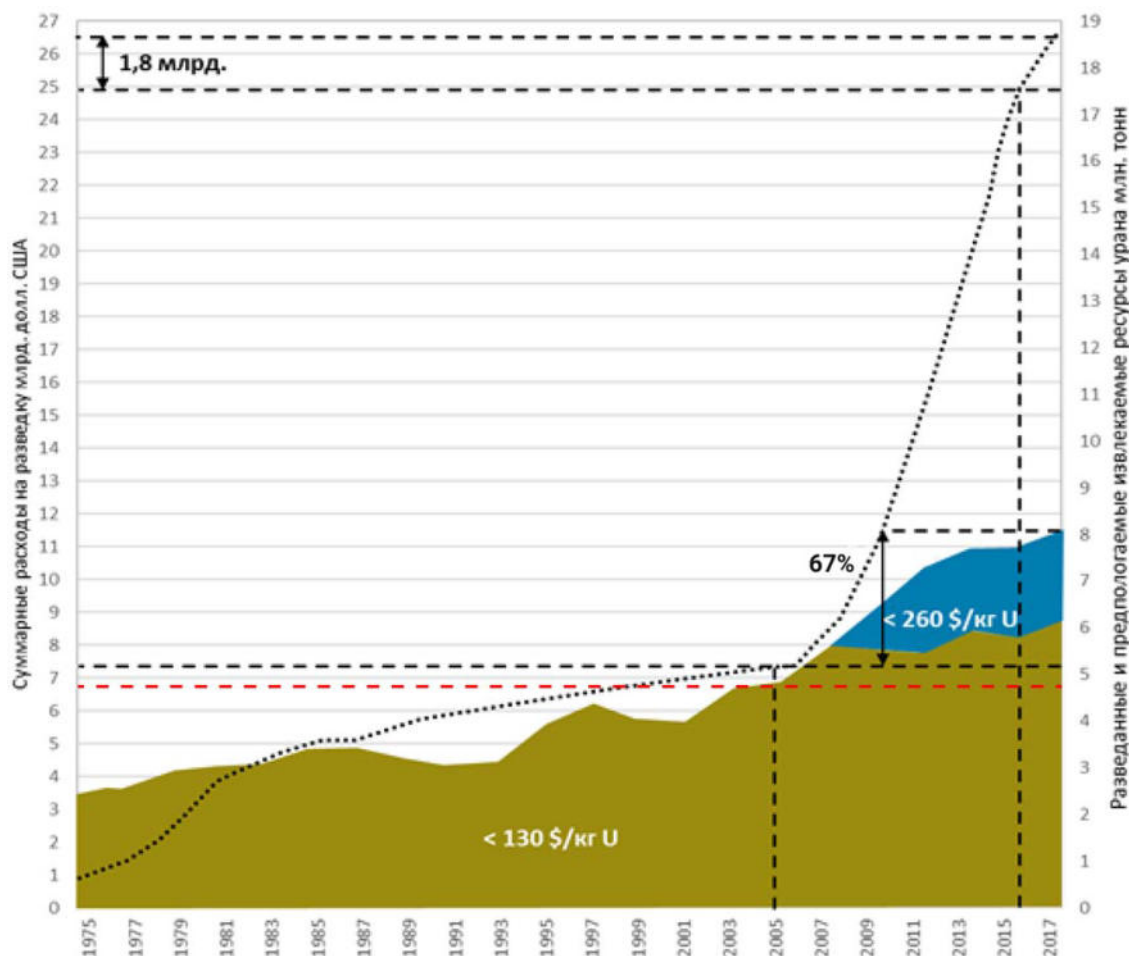


Рис. 6. Рост извлекаемых запасов природного урана (в зависимости от себестоимости добычи) по годам, в период 1975–2016 гг. (на 01.01.2017 г.)

Fig. 6. The growth of recoverable reserves of natural uranium (depending on the cost of production) by years, in the period 1975–2016. (01/01/2017)

Из рис. 6 видно, что в мире в период 1975–2016 гг. извлекаемые запасы природного урана, с невысокой себестоимостью его добычи (менее 130 долл. США/кгU) выросли с 3,5 до 6,1 млн т., или в 1,75 раз, а с приемлемой себестоимостью (менее 260 долл. США/кгU) с 3,5 до 8,0 млн т., или в 2,3 раза.

Рост извлекаемых запасов природного урана в мире прямо связан с увеличением затрат на геологоразведку урана и оценку его запасов на разведанных месторождениях. Так, в период 2005–2016 гг. на эти цели было потрачено 20 млрд долл. США (см. рис. 6). В результате извлекаемые запасы природного урана увеличились с 4,8 до 6,1 млн т, или на

27 % (с себестоимостью добычи менее 130 долл. США/кгU) и до 8,0 млн т, или на 67 % (с себестоимостью добычи менее 260 долл. США/кгU) [5].

В табл. 1 показаны разведанные и извлекаемые запасы природного урана в мире (на 01.01.2017 г.) с различным уровнем себестоимости добычи [5].

Из табл. 1 видно, что объём извлекаемых запасов с невысокой себестоимостью добычи (менее 130 долл. США/кгU), составляет основную долю (77 %) от аналогичного объёма с приемлемой себестоимостью (менее 260 долл. США/кгU). При этом, доля извлекаемых запасов в объёме разведанных составляет 75 %.

Таблица 1

Table 1

Себестоимость добычи	< 40 \$/кгU	< 80 \$/кгU	< 130 \$/кгU	< 260 \$/кгU
	Запасы			
Разведанные запасы, т	1 294 700	2 618 000	8 122 000	10 653 000
<b>Извлекаемые запасы, т</b>	<b>1 057 700</b>	<b>2 079 500</b>	<b>6 142 000</b>	<b>7 988 600</b>
Разница, т	237 000	538 500	1 979 900	2 664 300
Доля извлекаемых запасов, %	81,7 %	79,4 %	75,6 %	75,0 %

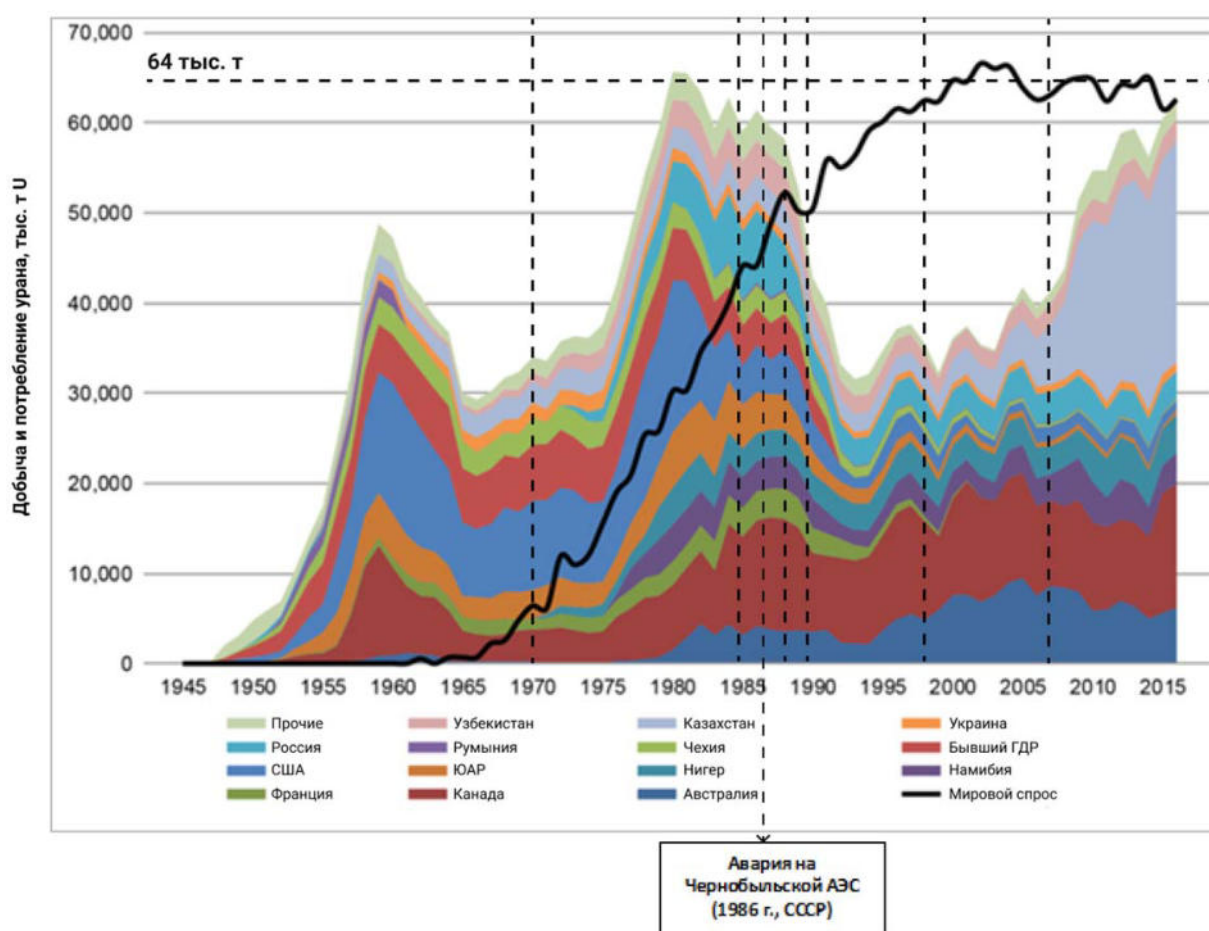


Рис. 7. Динамики добычи и потребления природного урана для АЭС в мире по годам, в период с 1945–2015 гг.

Fig. 7. The dynamics of the extraction and consumption of natural uranium for nuclear power plants in the world by years, from 1945–2015.

Теперь рассмотрим баланс между добычей и потреблением природного урана для производства ядерного топлива для АЭС в мире.

На рис. 7 показана динамика добычи и потребления природного урана для АЭС в мире по годам, в период 1945–2017 гг. [10].

Из рис. 7 видно, что в период 1945–1991 гг. объем добычи природного урана значительно превышал его потребления для АЭС. Существенная доля добытого природного урана шла на военные нужды и склад. Впервые в 1991 г. объем добычи природного урана **совпал** с его



потреблением для АЭС. В последующий период, 1991–2007 гг., потребление природного урана для АЭС покрывалось его добычей только до 50–60 %, остальное поступало со склада. А в период 2008–2015 гг. объемы добычи природного урана выросли до **60 тыс. т** в год и сбалансировались с уровнем его потребления для АЭС.

Из рис. 6, 7 видно, что при нынешнем уровне электропроизводства на АЭС извлекаемых запасов природного урана хватит на **100 лет**, при низкой себестоимости добычи (менее 130 долл. США/кгU), и на **130 лет**, при приемлемой себестоимости (менее 260 долл. США/кгU).

Из рис. 4, 7 также следует, что в 1989–2001 гг. потребность природного урана для АЭС увеличилась в 1,3 раза, ровно настолько, насколько произошел рост электропроизводства на АЭС. Этот факт является дополнительным обоснованием достоверности данных по потреблению урана и электропроизводства на АЭС в мире.

В мире в 2018 г., по данным базы данных МАГАТЭ [7], эксплуатировались **450** энергоблоков АЭС с суммарной установленной мощностью **397 ГВт** [8], которые произвели **2 692 ГВт·ч**, со средневзвешенным КИУМ, равным 77,4 % [9]. Соответственно, доля АЭС в общем объеме электропроизводства в мире составила 10,1 % (этот объем в 2018 году равнялся 22 964 ГВт·ч [2]). При этом потребление природного урана равнялось **64 тыс. тU** (произведено 59,46 тыс. тU, что составило 93 % от потребности) [10]. **Соответственно, на 1 ГВт·ч приходилось 2,4 тU, или на 1 кВт·ч – 2,4 гU**

**6. Прогноз роста суммарной установленной мощности энергоблоков АЭС в мире в 2015–2050 гг.** Сохранение или даже некоторое снижение спроса на электроэнергию в ряде развитых стран (США, ОЭСР), установление низкой цены природного газа и связанной с ней низкой цены энергетического угля сначала в

США в 2009–2014 гг., а затем в Европе и во всем мире, конкуренция со стороны субсидируемых государствами ВИЭ **ограничивают** инвестиции в капиталоемкие проекты строительства АЭС с длительным сроком одобрения регулирующими органами. В результате развитие атомной энергетики в этих странах **существенно** усложняется, особенно на либерализованных электроэнергетических рынках.

Ситуацию усугубила также тяжелая авария на АЭС «Фукусима» в 2011 г., произошедшая через 25 лет после аварии на Чернобыльской АЭС. По масштабу воздействия на окружающую среду она оказалась заметно меньше, чем авария на ЧАЭС. Однако по воздействию на общественное мнение стала сопоставима с аварией на ЧАЭС. Поэтому этой аварии был присвоен самый высокий уровень – 7, такой же, как и аварии на ЧАЭС (см. раздел 1.2). В результате авария на АЭС «Фукусима-1», по самым оптимистическим сценариям, затормозит минимум на 10–15 лет начало **возможного** массового строительства энергоблоков АЭС в мире (кроме Китая). Соответственно, их подключение к сети будет сдвинуто на 15–20 лет.

Массовое строительство АЭС в мире, кроме Китая, можно ожидать в крупных и средних по размеру экономиках развивающихся стран, имеющих дефицит ископаемых энергоресурсов или программы замещения «грязных» энергоисточников (в первую очередь, угольные ТЭС) на «чистые», куда входит атомная энергетика.

При разработке прогноза динамики установленных мощностей энергоблоков АЭС, подключенных к сети в 2019–2050 гг., необходимо учитывать суммарную мощность энергоблоков АЭС по годам, достигших предельного срока службы 60 лет, которые должны быть выведены из эксплуатации в этот период.

На рис. 8 показано число энергоблоков, выводимых из эксплуатации, и их суммарная мощность в 2019–2050 гг.

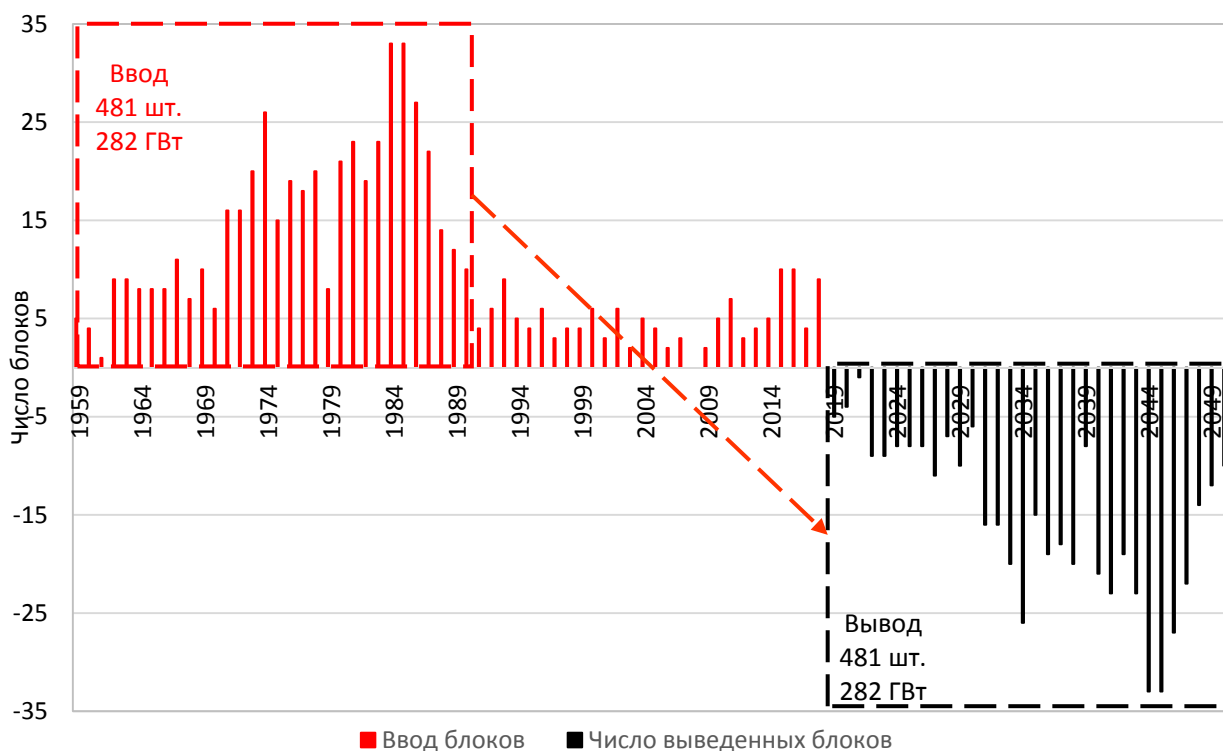


Рис. 8. Число энергоблоков, выводимых из эксплуатации, и их суммарная мощность в 2019–2050 гг.  
 Fig. 8. The number of power units decommissioned and their total capacity in 2019–2050.

Из рис. 8 видно, что все энергоблоки АЭС, подключенные к сети в 1959–1989 гг. (481 блок суммарной мощностью **282 ГВт**, оценка снизу), должны быть выведены из эксплуатации в 2019–2050 гг. (если они не были выведены из эксплуатации ранее), так как в этот период эти энергоблоки достигнут предельного срока эксплуатации — 60 лет. Оценки показывают, что примерно 40–45 энергоблоков АЭС суммарной мощностью 35 ГВт были выведены ранее 60-тилетнего срока эксплуатации.

По данным МАГАТЭ [11] мире в период 2016–2020 гг. запланировано начать строительство 56 энергоблоков АЭС суммарной мощностью 56 ГВт, из которых в Китае будет начато строительство 23 энергоблоков суммарной мощностью 26 ГВт. Отсюда следует, что суммарная мощность строящихся энергоблоков АЭС в мире (кроме Китая), по отно-

шению к соответствующим мощностям в Китае, составляет **60/40**.

Для прямой экстраполяции этой пропорции в 2021–2050 гг. требуется дополнительное обоснование, так как в этот период существуют большие неопределенности для начала строительства энергоблоков АЭС в других странах мира по сравнению с Китаем.

В сценарных условиях при разработке прогноза роста суммарной мощности энергоблоков АЭС, подключаемых к сети, в 2016–2050 гг. **учитываются** следующие обстоятельства:

- мощность энергоблоков АЭС по годам, достигших предельного срока 60 лет, которые должны быть выведены из эксплуатации в 2016–2050 гг. Суммарная мощность таких энергоблоков составляет **282 ГВт** к 2050 г. (см. рис. 8);
- мощность энергоблоков АЭС, подключаемых к сети в Китае по годам в 2016–2050 гг.,



принимается в соответствии с базовым прогнозом электропроизводства на АЭС в этой стране по данным CNPC Economics & Technology Research Institute (ETRI) 2016 [12] и прогнозу средневзвешенного КИУМ АЭС Китая. Средневзвешенный КИУМ АЭС в Китае в 1995–2015 гг. существенно изменялся от 70 % до 90 %. Предполагается, что он будет линейно расти с 79 % (в 2015 г) до 84 % (средневзвешенный КИУМ в мире) в 2050 г.

- ограниченное развитие атомной энергетики в мире (вне Китая) из-за отсутствия роста электропотребления в развитых странах, ограниченных инвестиционных возможностей в развивающихся странах, конкуренции ВИЭ и ТЭС на природном газе, из-за прогнозируемой долговременной низкой цены газа, постфуксимского синдрома; ограничения мощностей по производству энергетического оборудования для АЭС в Китае, Южной Корее и России — основных стран —экспортеров АЭС;

- нулевая вероятность очередной тяжелой аварии на АЭС в мире.

Прогноз суммарной установленной мощности АЭС в мире базируется на допущении, что Китай к 2050 г. достигнет установленной мощности АЭС **246 ГВт** (оценка сверху) с суммарной выработкой электроэнергии 1,81 трлн кВт·ч [12], при КИУМ 84 %

На рис. 9 показан рост суммарной установленной мощности АЭС в Мире и отдельно в Китае на период 1970–2018 гг. (факт) и прогнозы настоящей работы для Мира и CNPC ETRI 2018 для Китая на период 2019–2050 гг.

Из рис. 9 видно, что в Мире в период 2019–2030 гг. по прогнозу настоящей работы рост установленной мощности АЭС сохраняет примерно такой же темп, как в предыдущий период 1987–2018 гг., а после 2030 г., темп роста резко увеличивается из-за роста строительства АЭС в Китае и Индии. Рост установленной мощности АЭС в Китае в период 2018–2050 гг. соответствует прогнозу CNPC ETRI 2018 по базовому

сценарию. В 2018–2050 гг. она должна вырасти с 43 до 200 ГВт, или в 4,7 раза.

При этом объем строительства АЭС (по мощности) в мире (без Китая), в период 2016–2050 гг. будет находиться в диапазоне 145–290 ГВт.

Цель для России — иметь 50 % заказов нового строительства АЭС в мире, а это минимум 73 гВт = 145/2, или 2,4 гВт в год (2 энергоблока в год)

Для достижения этой цели необходимо, чтобы серийный проект АЭС ВВЭР (улучшенный) отвечал следующим требованиям:

- Снижение удельной материалоемкости до 25–30 % реакторного отделения (железобетон, масса трубопроводов, количество арматуры, длина кабелей, объемы зданий и пр.) на уровне CAP1000 (AP1000 локализованный в КНР)

- Срок сооружения 40 мес. (целевое значение для серийных блоков ВВЭР-ТОИ)

- Блок-модульное сооружение и, соответственно, переход к повышенной точности и качеству изготовления строительных конструкций

- Российская АСУ ТП

- Внутрикорпусное удержание расплава

- Зарубежная нормативная база (например, ASME коды для прочностных расчетов)

- Максимальное использование пассивных систем не в дополнение, а вместо активных

**7. Прогноз роста мирового электропроизводства на АЭС в 2016–2050 гг.** На рис. 10 показана динамика электропроизводства на АЭС в мире и отдельно в Китае, США, Индии, Японии, ЕС-28, Канаде, Южной Корее и России в период 1970–2018 гг. (факт) и прогноз на 2019–2050 гг.

Из рис. 10 видно, что по базовому сценарию мировое электропроизводство на АЭС увеличится с **2,69** (2018 г.) до **4,04 трлн кВт·ч** (2050 г.), или на 50 %.

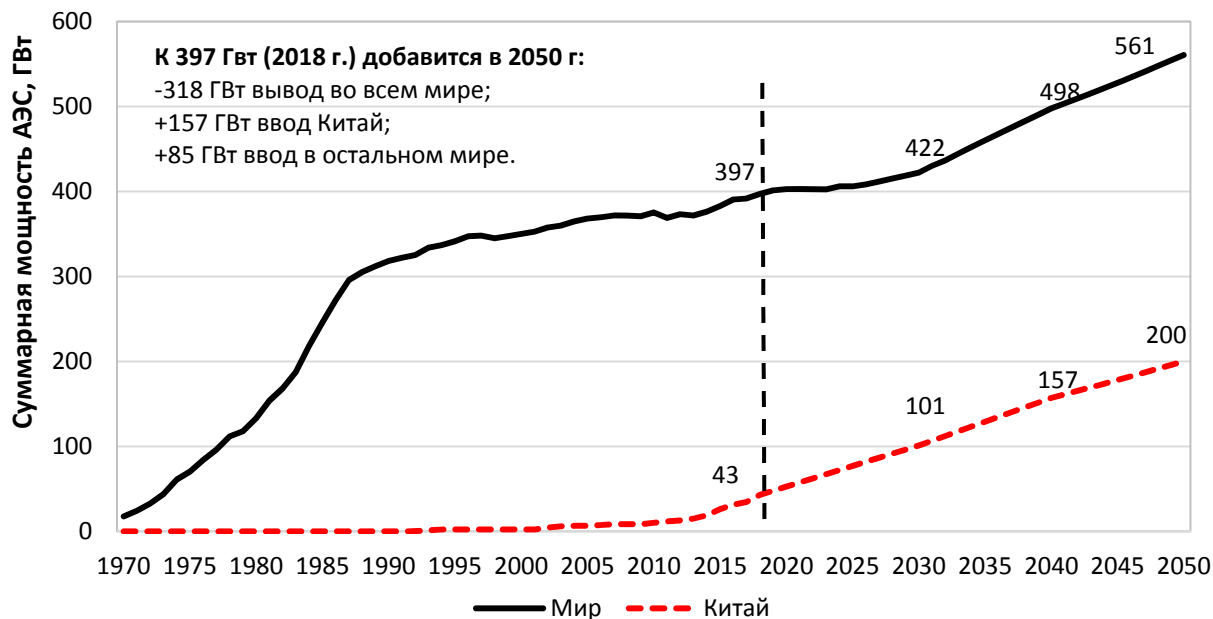


Рис. 9. Рост суммарной установленной мощности АЭС в Мире и отдельно в Китае в 1970–2018 гг. и прогнозы CNPC ETRI 2018 для Китая и настоящей работы для мира на 2019–2050 гг.

Fig. 9. The growth of the total installed capacity of nuclear power plants in the world and separately in China in 1970–2018. 2018 CNPC ETRI forecasts and forecasts for China and current work for the world 2019–2050.

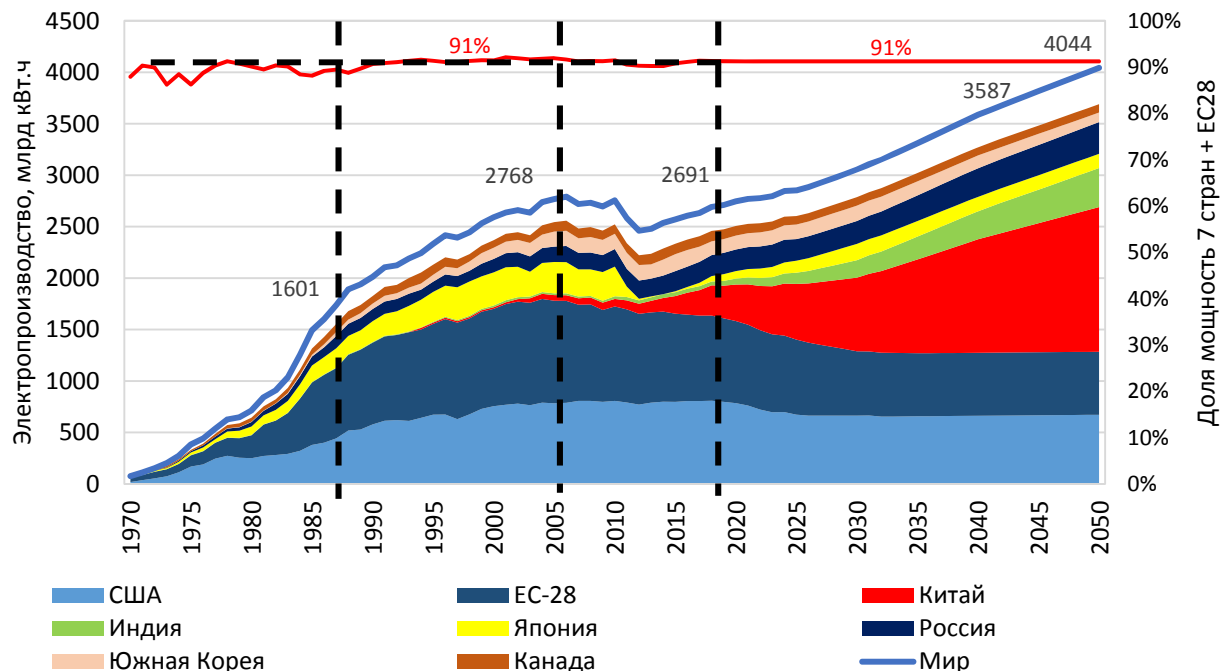


Рис. 10. Динамика электропроизводства на АЭС в мире и отдельно в Китае, США, Индии, Японии, ЕС-28, Канаде, Южной Корее и России в период 1970–2018 гг. (факт) и прогноз на 2019–2050 гг.

Fig. 10. The dynamics of electric production at nuclear power plants in the world and separately in China, the USA, India, Japan, EU-28, Canada, South Korea and Russia in the period 1970–2018. (fact) and forecast for 2019–2050.

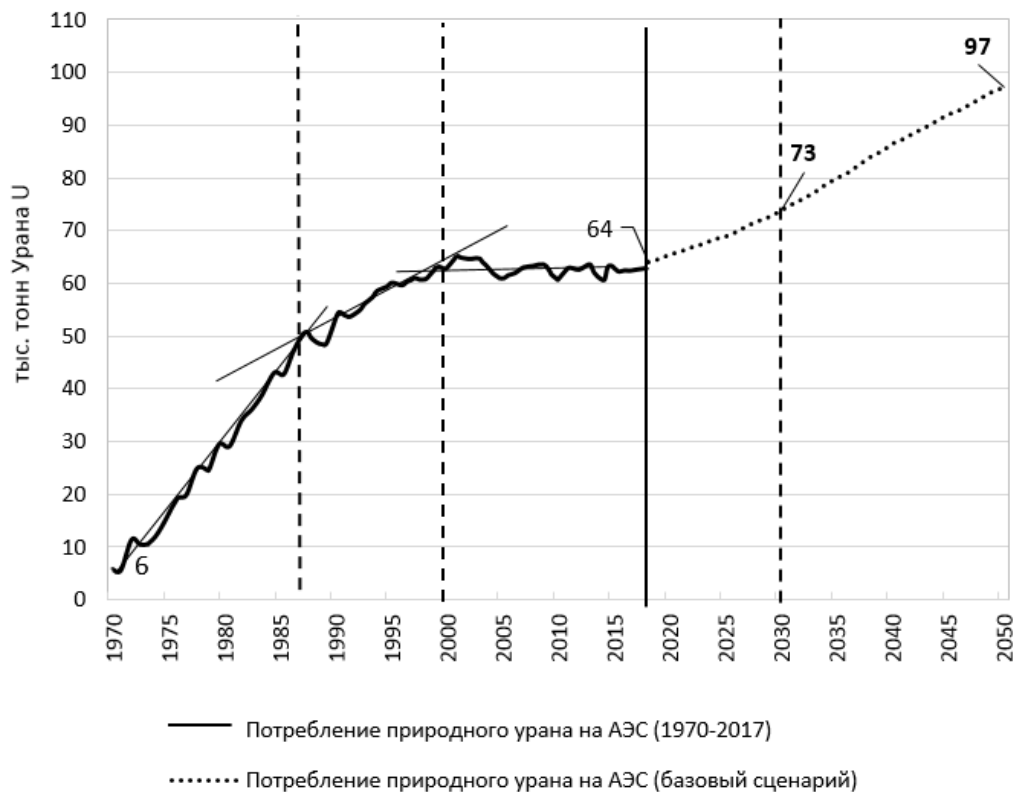


Рис. 11. Динамика потребления природного урана, соответствующая динамике мирового электропроизводства на АЭС в 1970–2018 гг. (факт.), и прогноз на 2019–2050 гг.

Fig. 11. The dynamics of consumption of natural uranium, corresponding to the dynamics of world electric production at nuclear power plants in 1970–2018. (fact.) and forecast for 2019–2050.

**8. Прогнозы роста мирового потребления урана и его разведанных запасов в 2016–2050 гг.** В разделе 5 было получено, что на 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной на АЭС в мире, в среднем затрачивается 2,4 гU. Тогда по данным динамики мирового электропроизводства на АЭС (рис. 10) можно рассчитать динамику потребления природного урана для такой динамики производства электроэнергии.

На рис. 11 показана динамика потребления природного урана, соответствующая динамике

мирового электропроизводства на АЭС в 1970–2018 гг. (факт.), и прогноз на 2019–2050 гг.

По данным рис. 12 было получено, что **имеющихся** извлекаемых запасов природного урана при оптимистическом (максимальном) прогнозе роста электропроизводства хватит на **96 лет** (с себестоимостью добычи менее 130 \$/кгU) и на **125 лет**, с себестоимостью добычи менее 260 \$/кгU. **Отсюда следует, что технология ЗЯТЦ с БР, возможно, станет коммерчески востребованной не ранее чем после 2050 г.**

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] IAEA Power Reactor Information System.
- [2] Enerdata Global Energy Statistical Yearbook 2018. URL: <https://2019book.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>
- [3] WorldBank database URL: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=NY.GDP.PCAP.PP.CD&country=#>
- [4] URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>
- [5] Uranium 2018 Resources, Production and Demand. OECD NEA & IAEA).
- [6] OECD NEA & IAEA, Uranium 2017: Resources, Production and Demand ('Red Book').



[7] IAEA PRIS Power Reactor Information. Trend in Electricity. Supplied Sum of electricity supplied from reactors connected to the grid (accessed January 17, 2017).

[8] OECD NEA & IAEA, Uranium 2018: Resources, Production and Demand ('Red Book').

[9] World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report 2018. URL: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/b392d1cd-f7d2-4d54-9355-9a65f71a3419/performance-report.pdf.aspx>

[10] World Nuclear Association, World Uranium Mining Production (updated March 2019). URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

[11] OECD NEA & IAEA, Uranium 2016: Resources, Production and Demand (Red Book).

[12] CNPC Research Institute of Economics and Technology, World and China Energy Outlook 2016.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**НИГМАТУЛИН Булат Искандерович** – доктор технических наук Генеральный директор Института проблем энергетики

E-mail: nb@geotar.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 11.10.2019

### REFERENCES

[1] IAEA Power Reactor Information System.

[2] Enerdata Global Energy Statistical Yearbook 2018. URL: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>

[3] WorldBank database. URL: <https://databank.worldbank.org/reports.aspx?source=2&series=NY.GD.P.PCAP.PP.CD&country=#>

[4] URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/supply-of-uranium.aspx>

[5] Uranium 2018 Resources, Production and Demand. OECD NEA & IAEA).

[6] OECD NEA & IAEA, Uranium 2017: Resources, Production and Demand ('Red Book').

[7] IAEA PRIS Power Reactor Information. Trend in Electricity. Supplied Sum of electricity supplied

from reactors connected to the grid (accessed January 17, 2017).

[8] OECD NEA & IAEA, Uranium 2018: Resources, Production and Demand ('Red Book').

[9] World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report 2018. URL: <https://www.world-nuclear.org/getmedia/b392d1cd-f7d2-4d54-9355-9a65f71a3419/performance-report.pdf.aspx>

[10] World Nuclear Association, World Uranium Mining Production (updated March 2019). URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

[11] OECD NEA & IAEA, Uranium 2016: Resources, Production and Demand (Red Book).

[12] CNPC Research Institute of Economics and Technology, World and China Energy Outlook 2016.

### THE AUTHOR

**NIGMATULIN Bulat I.** – *Institute of Energy Problems*

E-mail: nb@geotar.ru

Received: 11.10.2019