

DOI: 10.18721/JEST.25302
УДК 621.039

В.И. Гуменюк¹, А.Ю. Туманов¹, Г.Л. Атоян²

1 – Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

2 – Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН,
Санкт-Петербург, Россия

АТОМНАЯ ОТРАСЛЬ РОССИИ: РАЗВИТИЕ В НОГУ СО ВРЕМЕНЕМ

Ожидается, что необходимость решения проблемы глобальной нехватки энергетических ресурсов в XXI веке послужит новым импульсом в развитии атомной отрасли России. Развитие, безусловно, должно проходить с учетом достижений и опыта, приобретенных атомной отраслью в предыдущие годы. Намечается активное внедрение инновационных технологий – как в области мониторинга состояния оборудования атомных станций (АС), так и в области переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). К концу XXI века предполагаемое освоение замкнутого топливного цикла является необходимым условием экономического роста, как и выход на рынок промышленных энергетических реакторов. Для успешной реализации долгосрочной стратегии развития необходимо своевременное решение существующих проблем атомной отрасли, а также постановка новых, адекватных времени вопросов. В частности, для атомной отрасли особую важность представляют задачи прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций (ЧС) на ядерных энергетических объектах.

Ключевые слова: атомная отрасль, ядерная энергетика, атомная станция, ядерный реактор, энергетическая установка, термоядерный реактор, ИТЭР, мониторинг, прогнозирование, чрезвычайная ситуация.

Ссылка при цитировании:

Гуменюк В.И., Туманов А.Ю., Атоян Г.Л. Атомная отрасль России: развитие в ногу со временем // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 28–46. DOI: 10.18721/JEST.25302

V.I. Gumenyuk¹, A.Yu. Toumanov¹, G.L. Atoyan²

1 – Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, St. Petersburg, Russia

2 – St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, St. Petersburg, Russia

ATOMIC INDUSTRY OF RUSSIA: KEEPING UP WITH THE TIMES

It is expected that the necessity to solve the problem of global deficiency of energy resources in the 21st century may give a new impulse to the development of atomic industry in Russia. The development undoubtedly should proceed taking into account the achievements and the experience acquired by the atomic industry in the previous years. Active introduction of innovative technologies is expected, both in the area of monitoring of the state of equipment of nuclear power plants, and in the area of processing the spent fuel. The planned mastering of the closed fuel cycle is the necessary condition of economic growth as well as entering the market of industrial energy reactors by the end of the 21st century. Successful implementation of the long-term development strategy requires timely solution of existing problems of the atomic industry as well as posing new challenges in step with the times. In particular, the tasks of forecasting and prevention of emergency situations (ES) at nuclear energy objects are of special importance.

Keywords: atomic industry, nuclear energy, nuclear plant, nuclear power reactor, energy unit, thermonuclear reactor, ITER, monitoring, forecasting, emergency situation.

Citation:

V.I. Gumenyuk, A.Yu. Toumanov, G.L. Atoyan, Atomic industry of Russia: keeping up with the times, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 28–46. DOI: 10.18721/JEST.25302



Введение. Вопрос энергопотребления современной цивилизации стоит очень остро. Согласно наиболее скромным оценкам, к середине XXI века потребление энергии на планете удвоится. Невозобновляемость природных ресурсов (нефть, газ, уголь) заставляет задуматься о переходе к альтернативным источникам электроэнергии, таких как тепло земных недр, ветрогенераторы, излучение Солнца. Однако не всегда климатические и географические условия позволяют их использовать. Необходимые для этого технологии еще не достаточно развиты. Поэтому, атомная энергетика занимает лидирующие позиции и пока эти позиции не уступит другим видам энергии [1, 8].

Одним из решений энергетической проблемы может стать активное развитие ядерной энергетики. Согласно прогнозам МАГАТЭ, к 2030 году на планете может быть построено до 600 новых энергоблоков (сейчас их насчитывается 440). На увеличении доли ядерной энергетики в мировом энергобалансе могут сказаться такие факторы, как надежность, приемлемый уровень затрат по сравнению с другими отраслями энергетики, сравнительно небольшой объем отходов, доступность ресурсов.

К основным преимуществам ядерной энергетики следует отнести:

- огромную энергоемкость ядерного топлива;
- возможность повторного использования топлива (после регенерации);

- отсутствие парникового эффекта от ядерных энергетических установок.

Следует отметить, что ядерная энергетика лишена тех недостатков, которые имеются у альтернативных источников энергии. Так, затраты на производство солнечной батареи превышают все доходы от получаемой с ее помощью энергии. А, например, ветрогенераторы имеют невысокую мощность, высокую стоимость и экологические ограничения. Их размещение существенно изменяет ландшафт, а инфразвуковой шум, который они произво-

дят, опасен для людей и животных, что препятствует расположению ветрогенераторов вблизи населенных пунктов.

Поскольку атомная отрасль в нашей стране зародилась как военный проект, она имеет определенную специфику, требует повышенного уровня безопасности и режима нераспространения ядерных материалов и технологий. Ядерная энергетика получила самостоятельное развитие. Но нужно помнить, что и ядерные технологии оборонного комплекса России также непрерывно развиваются и совершенствуются, являются важнейшим сдерживающим фактором в противостоянии ядерных сверхдержав.

Цель работы – выявление закономерностей развития атомной отрасли России на основе анализа опубликованной информации и статистических данных, анализа современных угроз и уязвимостей. Исследование предполагает оценку роли атомной энергетики в мировом энергетическом балансе, анализ изменения структуры генерации и энергопотребления, в том числе, на фоне альтернативной энергетики, с учетом существующих и перспективных ядерных технологий, с учетом отечественных и зарубежных концепций безопасности (поколения I-IV энергетических ядерных реакторов). В работе также проведен обзор новых наиболее значимых атомных объектов – результатов современных отечественных достижений «мирного» атома (атомная отрасль – не только энергетика!), а также перечислены достижения отрасли в применении к военной и космической отраслям. Мотивация обзора – проиллюстрировать динамику развития атомной отрасли и ее текущее состояние, обозначить проблемы, предложить пути их решения, а также составить важнейшие рекомендации, определяющие ход развития отрасли с учетом решения задач повышения безопасности ядерных объектов, задач прогнозирования и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Методы исследований

Для каждого опасного объекта или производства (в том числе, инновационного) в общемировой практике принято проводить анализ безопасности, основанный на современных концепциях безопасности, на методах и методиках оценки риска, ущерба в случае аварии и безопасности объекта в целом – как на этапе создания проекта, так и при возникновении чрезвычайных ситуаций в ходе эксплуатации соответствующего объекта. В работе приведены ссылки на изученные и предложенные авторами подходы, используемые рабочие методики и методы.

Так, для инновационных проектов авторами разработана методика качественной и количественной оценки риска на основе данных анкетирования проектов и математических вероятностных методов [28], которая применима и для крупных проектов в атомной отрасли. А для оценки ущерба от радиационной аварии на плавучей атомной электростанции (ПАТЭС) авторы используют модель оценки ущерба, приведенную в действующей «Единой межведомственной методике оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера...» и модель оценки прогнозного предотвращенного ущерба [25]. Авторами также предложена модель системы поддержки принятия решений (СППР) по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах, основанная на структурировании и оценке внутренних информационных потоков объекта [30]. В работе [41] построена модель защищенности при перегрузке ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР, для критических элементов конструкции реактора вычисляется индекс защищенности, который введен с применением конструкционной теории надежности и вероятностных методов, авторами проведены расчеты. В работе [12] приведены принципы и методы повышения защищенности критически важных объектов (КВО) в системах управления, проанализированы основные угрозы и уязвимости.

Современное состояние и перспективы развития атомной энергетики в мире и в России. Доля атомной энергетики в мировом энергобалансе на сегодняшний день составляет около 17 %. По данным на 2014 г. в мире общая мощность энергетических реакторов составляла 377 ГВт [13], в настоящее время – уже 397 ГВт. Согласно оценкам экспертов МАГАТЭ, в настоящий момент в стадии строительства находится 55 энергоблоков, за период 2014–2020 гг. в мире будет построено до 130 новых энергоблоков, а суммарная мощность достигнет 430 ГВт. Это должно компенсировать выбывание старых энергоблоков и обеспечить повышение доли ядерной составляющей в мировом энергобалансе до 30 %. Текущее состояние наличия строящихся энергоблоков по странам (октябрь 2018 г.) приведено ниже (рис. 1), его предлагается сравнить с диаграммой за 2015 г. в [13]:

На рис. 2 приведено распределение действующих энергоблоков АЭС по странам. Следует отметить, что, в частности, крупнейшая энергетическая держава Китай запланировала интенсивное развитие ядерной энергетики, о чем свидетельствуют нынешние пятилетние планы КНР. В мае 2007 г. Государственный комитет по развитию и реформе Китая объявил, что к 2030 г. парк атомных станций КНР составит 160 ГВт.

В таких странах, как Россия, Китай, Индия, Республика Корея, США, Канада и Финляндия, разрабатываются и реализуются программы интенсивного развития ядерной энергетики. В Индии к 2020 году будут построены от 20 до 30 новых энергоблоков, а Китай собирается увеличить общую мощность до 50 гигаватт. По оценкам WNA (World Nuclear Association), общая мощность всех энергоблоков в мире к 2060 году достигнет по меньшей мере 1100 гигаватт, а учитывая современные темпы развития ядерной энергетики, эта цифра может достичь и 3500 гигаватт.

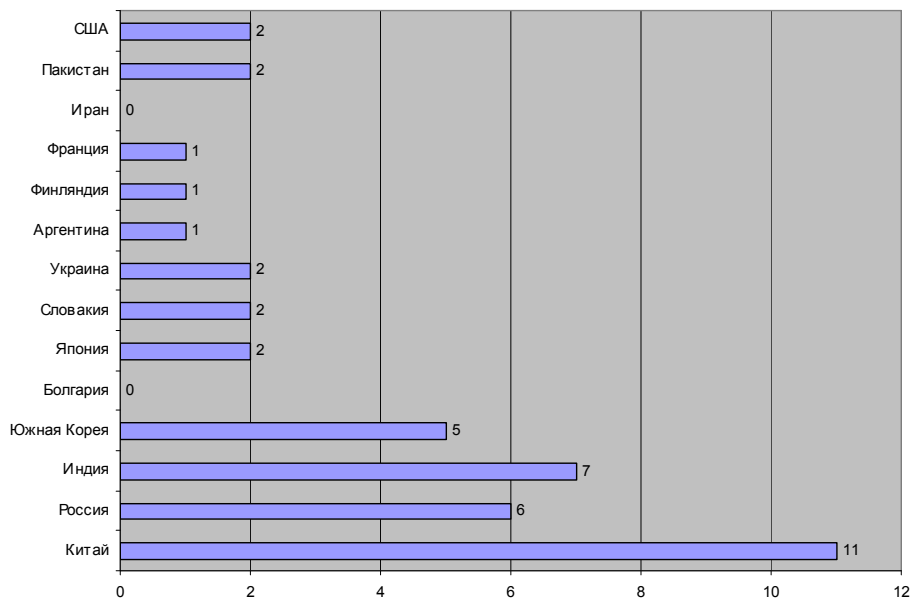


Рис. 1. Количество строящихся реакторов в мире по странам (октябрь 2018 г.)
 Fig. 1. The amount of reactors under construction in the world by countries (October, 2018)

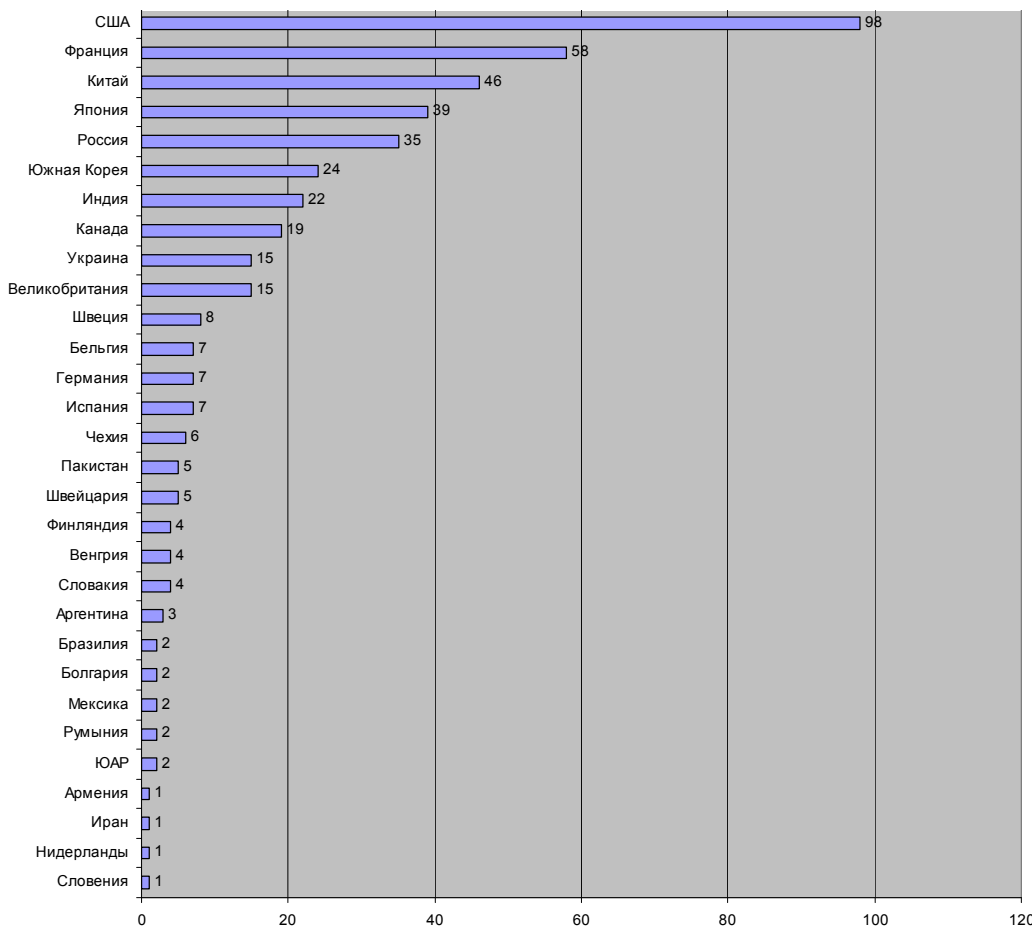


Рис. 2. Распределение действующих энергоблоков по странам (октябрь 2018 г.)
 Fig. 2. The distribution of active power generating units by countries (October, 2018)

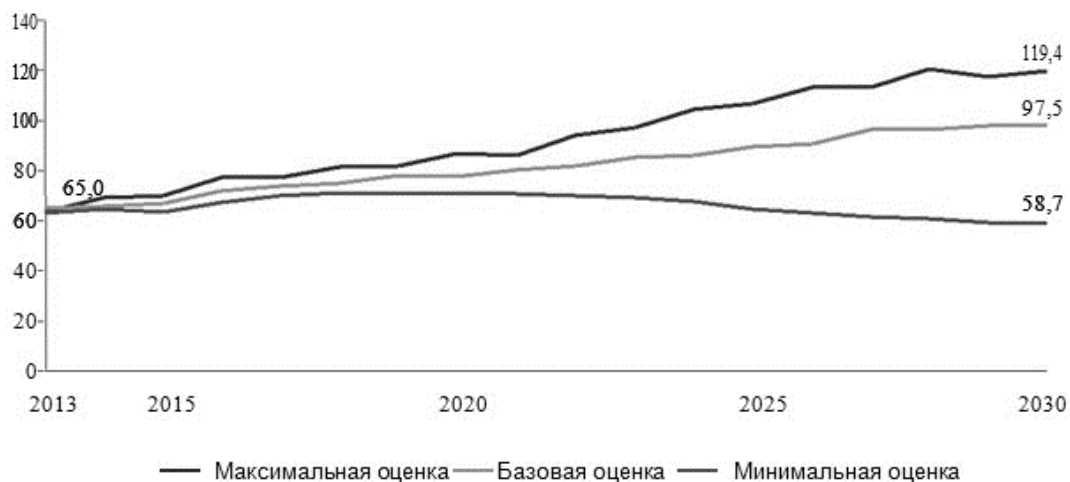


Рис. 3. Прогноз потребности в урановой руде до 2030 г.

Fig. 3. Demands in uranium ore forecast up to 2030

Всего в мире в стадии строительства находятся 55 новых энергоблоков (рис. 1), и до 2030 г., согласно наиболее скромным оценкам МАГАТЭ, планируется довести количество действующих энергоблоков до 600. На рис. 3 представлен прогноз потребности в урановой руде [14].

На сегодняшний день российская атомная отрасль представляет собой комплекс, в который входит более 360 предприятий и организаций, в которых занято свыше 250 тыс. человек. В структуре отрасли – крупные научно-производственные комплексы: предприятия ядерно-топливного цикла, атомной энергетики, ядерно-оружейного назначения и научно-исследовательские институты. Госкорпорация «Росатом» объединяет ряд предприятий атомной энергетики, а также предприятия ядерно-радиационной безопасности, ядерно-оружейного комплекса и фундаментальной науки.

Российская атомная отрасль является одной из передовых в мире по уровню научно-технических разработок в области проектирования реакторов, ядерного топлива, по опыту эксплуатации атомных станций, квалификации персонала АЭС. Предприятиями отрасли накоплен огромный опыт в решении мас-

штабных задач, таких, как создание первой в мире атомной электростанции (1954 г.) и разработка топлива для нее. Россия обладает наиболее совершенными в мире обогатительными технологиями, а проекты атомных электростанций с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР) доказали свою надежность в процессе тысячи реакторо-лет безаварийной работы. Высокое качество выпускаемой продукции и предлагаемых услуг подтверждается успехами в международных тендерах на поставки ядерного топлива и строительство АЭС за рубежом.

В России имеется 35 действующих энергоблоков в составе 10 АЭС общей установленной мощностью более 29 ГВт (январь 2019 г.). Доля атомной энергетики в энергобалансе страны составляет более 16 %, к 2020 году планируется увеличить этот показатель до 25–30 %.

Еще в 2007 году (и ранее, см. [6, 7, 9]) по заданию Росатома была начата разработка «Стратегии развития атомной энергетики до 2050 года». В рамках этой задачи Ученым советом НИЦ «Курчатовский институт» в сентябре 2011 года были сформулированы основные положения стратегии развития ядерной энергетики России до середины века. В этих положениях учитываются основные позиции одоб-

ренной Правительством РФ «Энергетической стратегии России до 2030 года» и федеральных целевых программ развития атомного энергопромышленного комплекса.

Согласно положениям «Стратегии», для дальнейшего развития ядерной отрасли и созданию новых поколений ядерных установок необходимо реализовать задачу максимального уменьшения их исходной опасности путем обеспечения внутренней самозащищенности с последовательным осуществлением принципов глубокоэшелонированной защиты (ГЭЗ). Для обеспечения гарантий безопасности ядерной энергетики следует выработать и внедрить в практику России международные критерии защиты от внешних воздействий и стихийных бедствий, а также систему мер управления тяжелыми авариями для устранения их последствий.

Длительные сроки функционирования объектов ядерно-энергетического комплекса и принципиальная неопределенность ценовых показателей исключают возможность использования формальных экономических критериев как определяющего фактора привлекательности атомного кластера, но позволяют ориентироваться на оценку «сверху» приемлемых затрат через средние мировые затраты на первичную энергию. Согласно такой методике приемлемая для экономики России стоимость установлен-

ной мощности АЭС в настоящее время составляет около 2000 долл./кВт, а к 2030 году она увеличится до 4000 долл./кВт [2, 4, 5].

Исходные предпосылки этого положения иллюстрируются на рис. 4, где обозначен критический уровень 10 % в доле затрат на первичные энергоисточники от валового продукта в мировой экономике. Превышение этого уровня в 1980 году и в 2008 году сопровождалось общемировыми экономическими кризисами.

Что касается более свежих данных (2014 г.), доля капиталовложений в энергетику в целом достигает порядка 1,3 % от общемирового ВВП против 6 % от ВВП России [15].

Коммерческий заказ для ядерно-энергетического сектора экономики в перспективе ближайших десятилетий будет сосредоточен на усовершенствовании реакторов на тепловых нейтронах, в первую очередь технологии корпусных легководных реакторов с обеспечением мощностного ряда для потребностей регионального развития в стране и в мире. Объективную перспективу имеют энерготехнологические возможности высокотемпературных реакторов, в том числе в области безопасности. Требования мирового рынка к быстрому реактору, предназначенному для массового строительства, еще не сформированы.



Рис. 4. Доля затрат на первичные энергоисточники от валового продукта в мировой экономике
Fig. 4. The energy sources expense ratio from gross product in the world economy

Структурные варианты развития ядерной энергетики, рассчитанные на установленную (с учетом экспортных поставок) мощность АЭС в 100 ГВт к 2030 году и 300 ГВт к 2050 г., с учетом ограничений по интегральному потреблению природного урана, его годовому потреблению и объему разделительных работ, демонстрируют необходимость серийного строительства быстрых реакторов с расширенным воспроизводством топлива ориентировочно с 2030 года.

Ожидается также появление так называемых *электроядерных энергетических установок (ЭЛЯУ), систем, управляемых ускорителем – Accelerator Driven System (ADS)* [31–37]. Эти системы представляют собой совместно работающий, как правило, подкритический ядерный реактор и ускоритель заряженных частиц (протонов или дейтронов). Демонстрационная электроядерная установка малой мощности 1 МВт, управляемая линейным ускорителем (14 МэВ), работает в ЦЕРНе (Швейцария) [32].

Мощный ускоритель при бомбардировке мишенной системы генерирует нейтроны, необходимые для поддержания реакции деления в ядерном реакторе, который может быть подкритическим. Это открывает возможность к использованию, например, ториевого топливного цикла для получения энергии из тория – элемента большой доступности. У подкритического реактора также исключена вероятность возникновения самоподдерживаемой цепной реакции (СЦР).

Связка «реактор-ускоритель» также позволяет осуществлять трансмутацию долгоживущих радионуклидов (актинидов) ОЯТ в короткоживущие продукты деления аналогично тому, как это происходит в реакторах-размножителях.

Задача построения промышленной ЭЛЯУ в мире еще не решена, хотя каждая из ядерных держав считает целесообразным развивать подобные проекты [31]. Построение промышленной ЭЛЯУ, совмещающей энергетический

реактор и установку по переработке радиоактивных отходов, будет иметь, прежде всего, не экономический, а глобальный экологический эффект. Благодаря переработке высокоактивных отходов (ВАО) в низкоактивные (НАО), можно избавиться от необходимости иметь долгосрочные хранилища и могильники. Это позволит переработать накопленные РАО, планировать строительство малых по площади ХОЯТ, снизить площади уже занятых хранилищ ОЯТ, а в перспективе – рекультивировать территории и земли, задействованные под долгосрочные могильники. Данное обстоятельство способно придать атомной энергетике в целом большую безопасность и «экологичность».

Существующие и перспективные технологии реакторных установок различаются характеристиками топливоиспользования. Возможные прогнозы роста установленной мощности должны это обстоятельство учитывать.

Максимальный вариант установленной мощности (в электрическом эквиваленте), с учетом экспорта, который соответствует умеренному сценарию МАГАТЭ:

2030 год – 100 ГВт(э);

2050 год – 300 ГВт(э).

Место ядерных энергоисточников в топливно-энергетическом комплексе страны определяется прежде всего экономичностью (конкурентоспособностью с другими видами топлива) и топливообеспеченностью.

Базовыми критериями выбора ядерных установок для развивающегося парка атомных станций являются:

практическая осуществимость;

экономическая и потребительская приемлемость;

обеспечение ядерной безопасности гражданского применения;

минимизация угрозы распространения ядерного оружия.

Для реакторов типа ВВЭР базовыми являются характеристики проекта АЭС-2006 (с



развитием для целей рыночной привлекательности в вариант ВВЭР-ТОИ-1200). Для эффективной работы в замкнутом топливном цикле необходимо создать (с внедрением после 2020 года) ВВЭР с кардинально улучшенным использованием топлива – ВВЭР-С (с коэффициентом воспроизводства до 0,8).

В ряду реакторов на быстрых нейтронах рассматриваются размножители БР-Р с высоким воспроизводством ($K_B \sim 1,4$), с умеренным воспроизводством $\sim 1,2$ (возможно БН-1200) и конверторы без расширенного воспроизводства БР-К ($K_B \sim 1,05$). При сооружении БР без расширенного воспроизводства возможна стартовая загрузка из обогащенного урана.

Все варианты развития могут быть сравнены со сценарием без переработки облученного ядерного топлива (открытый цикл) или со сценарием замыкания цикла только по урану-235.

В качестве основных ограничивающих критериев развития служат:

баланс природного урана (интегральные потребности и годовое потребление);

объемы разделительных работ.

Следует отметить, что с замыкание топливного цикла – строительство новых реакторов (быстрый реактор БР-Р, модернизированный реактор ВВЭР-С с коэффициентом воспроизводства до 0,8) и переход на основные генерирующие мощности на реакторах с воспроизводством топлива и с переработкой ОЯТ позволит осуществить значительную экономию природного урана, снизить долю высокоактивного ОЯТ при захоронении ядерных отходов.

Согласно последним данным, в России в настоящее время работают десять атомных электростанций суммарной установленной мощностью более 29 ГВт, имеющих 35 энергоблоков с реакторами разных типов. В их числе 18 энергоблоков с водо-водяными реакторами типа ВВЭР, 10 – с канальными реакторами типа РБМК, 3 – с канальными реакторами типа ЭГП-6 и 2 энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах – БН-600 и БН-800.

Ежегодный экспорт электроэнергии из России составляет около 17 млрд. кВт·ч на сумму 640 млн. долл. США (данные за 2017 г.).

После крупных аварий на американской АЭС «Три Майл Айленд» и Чернобыльской АЭС на всех российских атомных электростанциях был выполнен комплекс мер, исключающих повторение таких тяжелых ситуаций. В настоящее время завершена модернизация и техническое перевооружение энергоблоков АЭС первого поколения, что позволило не только существенно повысить уровень их безопасности, но также дало возможность обеспечить продление проектного срока эксплуатации на 5–10 лет.

Несмотря сырьевую зависимость Российской экономики и стагнацию части отраслей промышленности, атомные электростанции работают достаточно устойчиво и надежно. Они поставляют в необходимых количествах более дешевую электроэнергию потребителям в регионах, наиболее удаленных от месторождений дешевого органического топлива.

Эксплуатационные показатели, характеристики безопасности и надежности АЭС также являются стабильно высокими. По большинству из них российские АЭС не уступают зарубежным.

Несмотря на значительную роль, которую играет атомная энергетика в мировом энергетическом балансе, наметились тенденции снижения ее доли в общем энергопроизводстве и сворачивания ядерных программ в некоторых развитых странах Запада. Негативное отношение к атомной энергетике в отдельных странах объясняется сохраняющейся потенциальной опасностью АЭС при тяжелых авариях с повреждением ядерного топлива в реакторе, проблемами накопления, переработки и окончательного захоронения радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), которые еще до конца не решены.

Главными задачами, стоящими перед атомной энергетикой России на ближайший период, являются обеспечение высокого уровня

безопасности АЭС и поддержание достигнутого уровня производства электроэнергии с последующим ростом. Для реализации этих задач необходимо завершить техническое перевооружение и модернизацию энергоблоков АЭС первого поколения для повышения безопасности и продления срока их службы, а также вывод из эксплуатации тех энергоблоков, срок службы которых с учетом продления завершается. Необходимо строительство современных энергоблоков (условно реакторы 2-го поколения и выше). Примеры АЭС, на которых идет строительство современных энергоблоков: Курская АЭС-2 (энергоблоки №2-1 и №2-2 ВВЭР-ТОИ), Ленинградская АЭС-2 (энергоблок №2-2 ВВЭР-1200), Нововоронежская АЭС-2 (энергоблок №7 ВВЭР-1200) – рис. 5.

Новый реактор ВВЭР-1200 разрабатывался в рамках проекта «АЭС-2006», первый энергоблок данного типа на Нововоронежской АЭС был включен в энергосистему России в августе 2016 г. Получило распространение множество различающихся проектов реакторных установок на основе реактора ВВЭР-1200 – также на Ленинградской АЭС-2, на Балтийской АЭС, на Белорусской АЭС и др.

АЭС на основе ВВЭР-1200 характеризуются повышенным уровнем безопасности, позволяющим отнести их к поколению «3+». Это достигнуто внедрением новых «пассивных систем безопасности», которые способны функциони-

ровать без вмешательства операторов даже при полном обесточивании станции. На энергоблоке №1 Нововоронежской АЭС-2 в качестве таких систем применены система пассивного отвода тепла от реактора, пассивная система каталитического удаления водорода и ловушка расплава активной зоны. Другой особенностью проекта стала двойная защитная оболочка, в которой внутренняя оболочка предотвращает утечку радиоактивных веществ при авариях, а внешняя оболочка противостоит природным и техногенным воздействиям, таким как, например, смерчи или падение самолета.

Энергоблок с реактором ВВЭР-ТОИ (водо-водяной энергетический реактор типовой оптимизированный информационный) поколения «3+» – типовой проект инновационного энергоблока, который создавался как основа проектов серийного строительства атомных станций на площадках с широким диапазоном природно-климатических условий, в расчете на весь спектр внутренних экстремальных и внешних техногенных воздействий. Проект энергоблока разрабатывается таким образом, чтобы его последующее применение не требовало изменений основных концептуальных, конструктивных и компоновочных решений, а также не требовало проведения дополнительных анализов безопасности и дополнительных обосновывающих документов, представляемых в государственные надзорные органы.



Рис. 5. Слева – 2-й энергоблок Курской АЭС-2 с реактором типа ВВЭР-ТОИ (15.04.2019 г.), справа – строящийся 2-й энергоблок Ленинградской АЭС-2 с реактором ВВЭР-1200 (02.04.2019 г.)

Fig. 5. To the left – 2nd power unit of Kurskaya NPP-2 with WVER-TOI (15.04.2019), to the right – 2nd power unit of Leningradskaya NPP-2 with WVER-1200 (02.04.2019)

О поколениях реакторов атомных станций. Как известно, исторически сформировалось 4 поколения реакторных установок (РУ) [16], см. рис. 6. Исследователи также говорят и о реакторах 5-го поколения, как правило, как о гипотетических конструкциях, обладающих «абсолютной» безопасностью. Чаще всего, в этом случае речь идет о реакторах без вредных выбросов в окружающую среду и радиоактивных отходов, что теоретически способен, например, обеспечить замкнутый топливный цикл.

В СССР произошло первое деление поколений: АС, построенные до вступления в силу правил ОПБ-73, отнесли к первому поколению, а последующие – ко второму. После выхода ОПБ-73 стали рассматривать так называемые *максимальные проектные аварии* с разгерметизацией трубопроводов больших диаметров.

Авария на Три-Майл-Айленд не особенно повлияла на советскую концепцию безопасности в следующей редакции (ОПБ-82), хотя стимулировала научные исследования процессов, которые наглядно проявились: аварии с малой течью, аварийный залив активной зоны, процессы в разнообразных системах безопасности и т. п. На совершенствование представлений о безопасности в СССР в этот период большее влияние оказало сооружение АЭС «Ловииза» по советскому проекту и обоснование его перед регулирующим органом Финляндии. Это время удачно совпало с взрывным ростом компьютерной техники в мире, чем обусловлено системное развитие и у нас в стране детерминистских и вероятностных методов расчета.

Произошедшая в 1986 г. Чернобыльская катастрофа глобальным образом повлияла на концепцию безопасности АС во всем мире. Так, все проекты АС, выполнявшиеся после Чернобыля в соответствии с ОПБ-88, стали относиться к *третьему поколению*. Впоследствии, после вступления в силу Федерального закона «Об использовании атомной энергии» от 21.11.1995 г. № 170-ФЗ появилась редакция ОПБ-88/97, в которой содержались косметические изменения предыдущего текста.

Таким образом, 1986 г. послужил той вехой, от которой начинается отсчет развития требований по безопасности реакторов 3-го поколения, в частности, когда впервые был введен термин «*культура безопасности*», возникший в ходе западной критики отечественных реакторов РБМК.

Уже после аварии на Фукусиме (март 2011 г.) концепция безопасности АС все же была усовершенствована в разделе [17] «Основные критерии и принципы обеспечения безопасности». Тем не менее, оснований для провозглашения перехода к следующему поколению эти изменения не дали.

В современной литературе последних лет также можно найти упоминания о поколении 3+, которое связывается с требованием исключения эвакуации населения при любых, даже самых тяжелых авариях.

Однако подход к определению 4-го поколения РУ, по мнению автора в [16], требует существенного отличия идеологии безопасности от действующей для трех устоявшихся поколений РУ. Возможное развитие подобной идеологии было предложено в [18], где впервые была введена концепция реактора с «естественной» безопасностью, смысл которой идентичен понятию *внутренняя самозащитенность* (в иностр. лит. – *inherent safety*) РУ – свойство обеспечивать безопасность на основе естественных обратных связей, процессов и характеристик – понятию уже введенному в [17]. Опыт происшедших аварий, как показано в [19], свидетельствует о недостаточности мер и барьеров глубоко эшелонированной защиты для объектов с такой огромной концентрацией энергии, как атомная. В частности, будущее атомной энергетики связывается не с сооружением конверсионных реакторов, приспособленных для мирного использования, а с конструированием принципиально новых реакторов, изначально предназначенных для энергетики.

Таким образом, безопасность РУ будущего должна обеспечиваться не за счет реализации

барьеров глубоководной защиты, а за счет «последовательной реализации свойства внутренней защищенности РУ».

Следует отметить принципиальное отличие российских подходов от возникшего в 2000 г. международного проекта «Поколение IV» или GIV. Его рождение определялось не столько научными, сколько политическими целями, желанием США вовлечь некоторые страны в сферу влияния собственных намечаемых технологий. Во всяком случае, в настоящее время к реакторам, отнесенным к GIV, предъявляются требования к их безопасности, которые трудно назвать конкретными [20]: высокий уровень безопасности и надежности, низкая вероятность повреждения активной зоны, исключение мероприятий аварийного реагирования за пределами площадки АС. Последнее требование по существу такое же, как для поколения 3+.

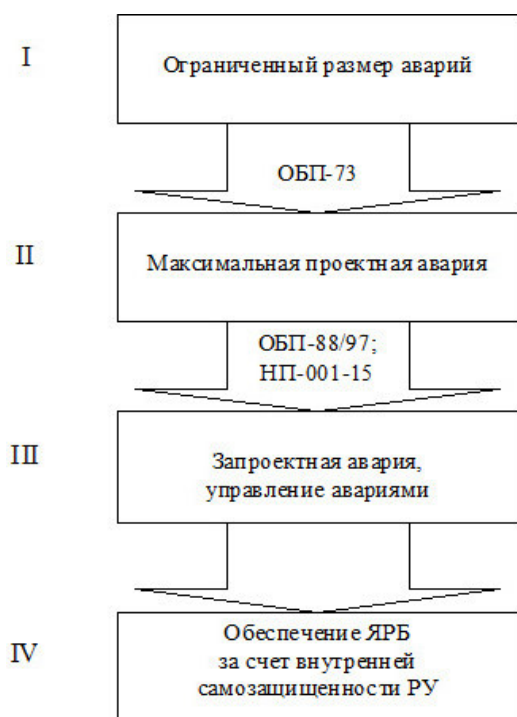


Рис. 6. Схема развития поколений (I–IV) реакторов атомных станций

Fig. 6. The development of nuclear energy reactors generations (I–IV) scheme

О реакторах с замкнутым топливным циклом. Современная атомная энергетика базируется главным образом на реакторах открытого топливного цикла, работающих на тепловых нейтронах, которые используют около 1 % добываемого урана. Поэтому экономически приемлемые запасы урана могут обеспечить топливом атомную энергетiku достигнутого уровня не более чем на 100 лет. В настоящее время в России не реализован в полной мере замкнутый топливный цикл: ведется переработка отработавшего ядерного топлива с ВВЭР-440 и судовых ядерных установок с последующим использованием регенерированного урана в реакторах РБМК. Важнейшей задачей является переход к полному замкнутому топливному циклу и радиационно-эквивалентному захоронению радиоактивных отходов.

Топливная база крупномасштабной атомной энергетики должна быть основана на воспроизводстве и повторном использовании всех делящихся ядерных материалов, а следовательно, замкнутый топливный цикл является обязательным условием для развития крупномасштабной атомной энергетики XXI в. Ее стратегическая целесообразность основана на:

практически неограниченных ресурсах ядерного топлива (с учетом внедрения замкнутого топливного цикла и реакторов-размножителей на быстрых нейтронах);

экономических преимуществ атомной энергетики по сравнению с традиционной теплоэнергетикой;

экологических преимуществ, заключающихся в отсутствии выбросов продуктов сгорания органического топлива.

Кроме того, следует отметить, что атомные электростанции служат основой Единой энергетической системы страны, особенно в энергозонах Северо-Запада и Центра России, так как мощные АЭС – Ленинградская, Смоленская, Курская, Калининская, Балаковская и Нововоронежская – являются узловыми и во многом определяют структуру высоковольтных линий электропередачи.

Об отечественных инновационных реакторах Брест-300. Брест-300 – разрабатываемый с конца 80-х гг. по настоящее время в России проект реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем, двухконтурной схемой отвода тепла к турбине и сверхкритическими параметрами пара. В декабре 2015 года было получено государственное разрешение на строительство реактора. Проведя соответствующие подготовительные работы и эксперименты, Росатом запланировал на 2019 г. начало строительства реактора по проекту БРЕСТ-ОД-300 (опытный демонстрационный) в качестве составной части проекта «Прорыв», консолидирующего разработки реакторов большой мощности на быстрых нейтронах, технологии замкнутого ядерного топливного цикла, а также технологии новых видов топлива и материалов, ориентированные на достижение нового качества ядерной энергетики. Электрическая мощность энергоблока в 300 МВт (тепловая мощность – 700 МВт) была выбрана как минимально необходимая для получения коэффициента воспроизводства топлива в активной зоне, равного единице. В проекте имеются спорные моменты, которые вызывают множество дискуссий и критики, а предложенные технические решения требуют соответствующего обоснования [21].

О термоядерном синтезе. Наряду с развитием ЯЭ на основе реакторов деления продолжают исследования возможности использования реакций синтеза легких ядер и реакций глубокого расщепления тяжелых ядер для выделения энергии и получения искусственного ядерного топлива. В течение последних десятилетий наблюдается значительный прогресс в реализации концепции управляемого термоядерного синтеза (УТС), в первую очередь на основе замкнутых магнитных ловушек – *токамаков*. На крупных физических установках этого типа достигнуты температуры и давле-

ния плазмы, необходимые для термоядерного горения. Для практического осуществления этого шага Россия, Европа, США и Япония объединили свои научные, технические и финансовые усилия для совместной разработки технического проекта первого в мире экспериментального термоядерного реактора, получившего название ИТЭР (*ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor*) [3], который будет построен во Франции.

Проект ИТЭР [3, 38–40] основан на многолетних исследованиях возможности магнитной термоизоляции высокотемпературной плазмы с поддержанием термоядерной реакции синтеза в стационарном режиме. Для устойчивой управляемой реакции выход энергии синтеза должен быть близок к энергозатратам на поджиг плазмы. Существующие в мире токамаки, предшествующие проекту ИТЭР, способны удерживать высокотемпературную плазму, но не на достаточно длительный период времени, необходимый для промышленной генерации энергии. ИТЭР – первая промышленная установка управляемой реакции синтеза мощностью 500 МВт. В то же время реактор ИТЭР – это лишь первый шаг на пути освоения человечеством управляемого термоядерного синтеза.

В проект вложены колоссальные средства (бюджет – 20 млрд. долларов). Первоначальный вариант реактора позволит осуществить поджиг плазмы разрядом, который будет длиться 300 секунд. В случае удачно проведенных экспериментов будут создаваться последующие версии реактора (DEMO1, DEMO2), работающие на непрерывном разряде, предположительно, порядка 2 часов.

Согласно последней информации (конец 2018 г.), строительство Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР завершено на 60 %. На площадку пребывают основные компоненты проекта, а в 2020 г. начнется полномасштабный процесс сборки.

Новые объекты атомной энергетики — исследовательские реактор «ПИК». В последнее время в России появляются новые объекты атомной энергетики. В частности, завершено строительство первого исследовательского реактора «ПИК» в Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) им. Б.П. Константинова в г. Гатчина под Санкт-Петербургом [22, 23]. Тепловая мощность реактора составляет 100 МВт. Реактор отличается от зарубежных проектов других подобных исследовательских установок повышенной плотностью нейтронного потока — ее максимальное значение составляет $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Физический пуск реактора состоялся в феврале 2011 г., а энергетический пуск намечен на 2019 г.

Плавающая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС). Среди новых объектов атомной энергетики — плавающая атомная теплоэлектростанция (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» [24]. Это первый в мире плавучий энергоблок (ПЭБ), не считая экспериментальных. Строительство и комплексные испытания ПЭБ были успешно завершены в апреле 2019 г. Строительство ПАТЭС начиналось на предприятии «Севмаш» (г. Северодвинск), парогенерирующие блоки для двух реакторов КЛТ-40с были изготовлены по проекту АО «ОКБМ Африкантов» на Балтийском заводе в Санкт-Петербурге. Реактор КЛТ-40с представляет собой отечественный судовой водо-водяной ядерный реактор тепловой мощностью 150 МВт (электрической — 35 МВт). Суммарная электрическая мощность обоих реакторных блоков составляет 70 МВт. В августе–сентябре 2019 г., когда будет закончена работа по строительству мол-причала и береговых сооружений, планируется передислокация ПЭБ на побережье Чукотки для снабжения тепловой и электрической энергией близлежащих портовых городов, а также нефтяных и газовых платформ, расположенных в открытом море. Подходы к оценке возможного ущерба в случае возникновения радиационной аварии на ПАТЭС изложены в [25].

Ядерные энергетические установки для космических аппаратов. Разработки ядерных энергетических установок для космических аппаратов, ядерных ракетных двигателей (ЯРД) проводились в СССР еще в 60-х гг. XX в. Хорошо известны советские разведывательные космические аппараты-спутники. Например, на спутниках «УС-А», используемых в 60–80-х гг. прошлого века, была установлена ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) БЭС-5 «БУК». Электрическая мощность установки составляла 3 кВт, тепловая — 100 кВт. Максимальный ресурс работы энергетической установки не превышал 135 суток. Испытания и эксплуатация подобных установок не всегда завершались успешно, что приводило к загрязнению атмосферы радиоактивными веществами, к загрязнению космических орбит при захоронении выведенных из эксплуатации реакторов.

В СССР было создано несколько типов энергетических установок для космоса. Выпуск подобных космических аппаратов был прекращен в 1988 г. — в частности, после Чернобыльской аварии, когда США и СССР выдвинули совместное предложение по запрещению использования ядерной энергии в космосе. Это предложение не получило формальных последствий, однако с тех пор запуски космических аппаратов с ядерными энергетическими установками на борту не проводились [26].

В настоящее время в России запланировано строительство летного образца космического аппарата с ядерной энергодвигательной установкой (ЯЭДУ) — инновационный проект Федеральной космической программы (ФКП) на 2016–2025 гг, совместно разрабатываемый Роскосмосом и предприятиями Росатома [27].

Использование мегаваттного реактора в ЯЭДУ как перспективного источника энергии в космосе сделает возможными дальние (межпланетные) космические экспедиции, которые столь необходимы при освоении космоса.

Для реактора новой конструкции в ЯЭДУ предложен подход, при котором энергия ядер-



ного топлива преобразуется сначала в электрическую, а последняя, в свою очередь, питает плазменный двигатель. При этом удельная тяга плазменного двигателя — в 20 раз выше, чем у химических реактивных двигателей. Преимущество перед прямоточным ядерным двигателем заключается в том, что через реактор проходит не реактивная струя водорода, как в прямоточном двигателе, а другое рабочее тело — инертный газ, нагретый до 1500°, «циклирующий» в замкнутом контуре реактора. Кроме того, нет необходимости нагревать водород до предельных значений, что упрощает проведение испытаний двигателя. Все испытания можно провести на территории России, не вступая в длительные переговоры по использованию ядерной энергии за пределами своего государства.

Основные затраты и финансовые показатели проекта представлены в открытом доступе. Для проведения всесторонней оценки риска подобных инновационных проектов удобно применять подходы и авторское программное обеспечение, описанное в [28].

Ядерные технологии в оборонном комплексе. Нужно помнить, что атомная отрасль определяет также и вектор развития своего «военного» двойника — ядерного «щита» России, являющегося важнейшим миротворческим элементом — сдерживающим фактором в противостоянии ядерных сверхдержав.

Президент России Владимир Путин в обращении к Федеральному собранию 1 марта 2018 г. объявил о создании в стране новейших стратегических систем вооружения, представленных как ответ на строительство Соединенными Штатами системы противоракетной обороны, а, в последствии, как оказалось, и как ответ на выход США из договора ДРСМД (февраль 2019 г.).

Обнародованная Президентом межконтинентальная крылатая ракета неограниченной дальности снабжена малогабаритной сверхмощной ядерной энергетической установкой. Пре-

зидент упомянул, что параметры ракеты сравнимы с ракетами «Томагавк» и «Х-101». Ракета получила кодовое название «Буревестник».

Решение о начале разработки «Буревестника» было принято еще в декабре 2001 г., после выхода США из Договора об ограничении систем противоракетной обороны 1972 г. Конструкция энергетической установки является продолжением давних разработок СССР, в то же время является новейшим военным проектом, не имеющим зарубежных аналогов. От проектов ядерных реактивных двигателей открытого типа (рабочее тело нагревается ядерным реактором) для ракет и самолетов, как известно, в США и в СССР в 60-х гг. XX в. отказались ввиду существенного загрязнения окружающей среды и их дороговизны — в пользу обычных реактивных двигателей.

В новой отечественной ракете — два двигателя: стартовый двигатель ракеты — твердо-топливный, а маршевый двигатель — ядерный воздушно-реактивный. Что касается габаритов: длина на старте — 12 м, в полете — 9 м, корпус во фронтальной проекции имеет эллиптическую форму 1×1,5 м. В «Буревестнике» используется прямоточная газовая турбина открытого типа, мощность двигателя оценивается приблизительно в 766 кВт.

Согласно данным ТАСС, ракета комплекса является дозвуковой. Траектория полета с учетом чрезвычайно продолжительного времени маневрирования, согласно замыслу разработчиков, обеспечивает возможность преодоления рубежей ПВО и ПРО. По официально неподтвержденным данным, в январе 2019 г. прошли успешные испытания ядерной энергетической установки для крылатой ракеты комплекса «Буревестник».

Безопасность объектов атомной энергетики и их конкурентоспособность. Повышение требований к безопасности объектов атомной энергетики и необходимость обеспечения их конкурентоспособности, в частности, за счет

уменьшения численности эксплуатационного персонала ставят на повестку дня совершенствование систем автоматизации, управления и контроля [8].

В частности, для атомных станций, оптимальный уровень автоматизации и функциональная и аппаратно-техническая полнота автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) определяются в значительной мере качеством и надежностью средств автоматизации. Отечественные АЭС по уровню и качеству систем автоматизации существенно уступают современным зарубежным станциям.

В качестве перспективного направления совершенствования АСУ ТП следует рассматривать применение отказоустойчивых высокопроизводительных вычислительных систем, обеспечивающих повышенное качество диагностики и прогнозирования состояния узлов и элементов оборудования, более надежную аварийную защиту, а также, оптимальный уровень взаимодействия «человек-машина». Комплекс технических средств при этом будет существенно проще и компактнее за счет перехода на новое поколение интегральных схем и компонентов и отказа от аппаратного исполнения систем функционально-группового управления.

Повышение надежности оборудования и компонентов АЭС, от которой в значительной степени зависит предотвращение развития наиболее неприятных аварийных ситуаций, связано со своевременным обнаружением дефектов в материалах конструкции. Сегодня наиболее освоены акустически-эмиссионные методы контроля состояния металлов конструкции, метод шумовой высокочастотной диагностики.

Особая проблема, также имеющая отношение к эксплуатации АЭС, связана со снятием с эксплуатации энергоблоков, исчерпавших свой ресурс.

Наряду с повышением надежности оборудования, с повышением уровня автоматизации, следует также назвать разработку мер,

предотвращающих или компенсирующих ошибочные действия персонала в аварийных режимах и чрезвычайных ситуациях.

Одним из важнейших аспектов безопасности и предупреждения аварий в будущем является разработка инженерных методов и методик оценивания безопасности ядерных реакторов в аварийных режимах работы.

Таким образом, ставятся задачи совершенствования систем мониторинга, систем управления подсистемами АЭС как критически важными объектами [10–12, 41], задачи создания и внедрения математических моделей поддержки управленческих решений [30].

Заключение

За всю историю развития атомной отрасли в мире накоплен огромный потенциал самых различных разработок и используемых инновационных подходов в атомной энергетике, в реакторостроении, в применении ядерных технологий в оборонном комплексе. Отметим, что Россия находится на передовых позициях как в вопросах обороноспособности, так и в применении мирного атома, а также способна занять ведущую роль в мировом сообществе при разделении труда в современном технологическом укладе, в решении насущных проблем, накопившихся в отрасли, в решении проблемы нехватки энергетических ресурсов, а также глобальных экологических проблем. Для этого необходимо внедрение в отрасль передовых физических принципов, освоение реакторов новых типов, внедрение новых технологий для совершенствования систем мониторинга, систем управления и систем безопасности критически важных объектов. Несмотря на все сложности в экономике, на постоянное перекардывание сроков реализации крупных проектов, на неблагоприятный военно-политический фон, на усугубившуюся террористическую опасность международного характера, имеющийся научно-технологический задел позволяет нашей стране с уверенностью смотреть в будущее.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Воронин Л.М.** Перспективы развития атомной энергетики России в XXI веке. URL: http://www.wdcb.ru/mining/articles/art_3/perspect.htm 1 (дата обращения: 31.03.2019).
- [2] **Гагаринский А.Ю., Велихов Е.П., Субботин С.А., Цибульский В.Ф.** Энергетика в экономике 21 века. РИЦ «Курчатовский институт». URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/050/43050825.pdf (дата обращения: 31.03.2019).
- [3] Энергетика будущего. Международный проект ИТЭР / под ред. академика Е.П. Велихова. М.: УТС-Центр, 2005.
- [4] **Велихов Е.П.** Энергетика в экономике мира XXI века // Труды МФТИ. 2011. Т. 3, № 4. С. 6–15.
- [5] **Цибульский В.Ф.** Энергетический индикатор состояния экономики. Открытый семинар «Экономические проблемы энергетического комплекса» (семинар А.С. Некрасова). М.: Изд-во ИИП РАН, 2013.
- [6] **Курчатов И.В., Александров А.П.** О стратегии ядерного энергетического развития: сб. М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2013. 144 с.
- [7] Стратегия развития атомной энергетики России в первой половине XXI века. Основные положения. Министерство Российской Федерации по атомной энергии. М.: 2000.
- [8] Роль ядерной энергетики в современном мире. Безопасность и стоимость // ЮНИДО в России. 2011. № 4. URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/ (дата обращения: 31.03.2019).
- [9] **Белогорьев А.М., Бушуев В.В., Громов А.И., Куричев Н.К., Мастепанов А.М., Троицкий А.А.** Тренды и сценарии развития мировой энергетики в первой половине XXI века / под ред. В.В. Бушуева. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2011. 68 с.
- [10] **Гуменюк В.И., Гравит М.В., Атоян Г.Л., Попов В.Ю., Попов И.Ю.** Проблемы совершенствования систем мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций на объектах ядерной энергетики // Неделя науки СПбПУ: сб. докл. Научного форума с междунар. участием XLIII. СПб., 2014. С. 11–18.
- [11] **Гуменюк В.И., Атоян Г.Л., Гравит М.В., Попов В.Ю., Попов И.Ю.** Разработка системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера по анализу объемной активности изотопов ксенона // Опыт ликвидации крупномасштабных чрезвычайных ситуаций в России и за рубежом: тез. докл. XIX Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. 2014. С. 100–101.
- [12] **Гуменюк В.И., Федосовский М.Е., Атоян Г.Л.** Принципы и методы повышения защищенности систем управления критически важных объектов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование. 2012. Вып. 147 (2). С. 209–225.
- [13] **Гуменюк В.И., Гравит М.В., Сорокин Л.Н., Атоян Г.Л.** Перспективы развития ядерной энергетики России и проблемы безопасности // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. форума с междунар. участием «Междисциплинарные секции и пленарные заседания институтов». 2015. С. 203–224.
- [14] **Амирова У.К., Урузбаева Н.А.** Обзор развития мирового рынка урана // Universum: Экономика и юриспруденция: [электрон. научн. журн.]. 2017. № (39). URL: <http://7universum.com/ru/economy/archive/item/4802>
- [15] Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года. Институт энергетических исследований Российской академии наук. Аналитический центр при Правительстве РФ. М., 2014. URL: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf>
- [16] **Гордон Б.Г.** О нумерации поколений ядерных реакторов. Дата: 31.01.2017. Тема: Безопасность и чрезвычайные ситуации. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7293>
- [17] Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ АС, НП-001-15. М.: НТЦ ЯРБ, 2016.
- [18] **Орлов В.В., Аврорин Е.Н., Адамов Е.О. [и др.].** Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью // Атомная энергия. 1992. Т. 72. Вып. 4.
- [19] **Гордон Б.Г.** Безопасность ядерных объектов. М.: Изд. НИЯУ «МИФИ», 2014.
- [20] An Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) for Generation IV Nuclear Systems, Risk and Safety Working Group (RSWG), June 2011. URL: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/gif_rsgw_2010_2_isamrev1_finalforeg17june2011.pdf

- [21] БРЕСТ. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%A2>
- [22] Реактор ПИК. URL: <http://www.pnpi.spb.ru/ustanovki/reaktor-pik>
- [23] ПИК (реактор). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_\(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80))
- [24] Академик Ломоносов. Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Академик_Ломоносов
- [25] **Зобнина Н.А., Зотова Л.Ю., Туманов А.Ю.** Оценка предотвращенного ущерба при радиационной аварии на ПАТЭС // Неделя науки СПбПУ: матер. науч. конф. с междунар. участием. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. С. 79–81.
- [26] Реакторы ядерных энергетических установок для космических и летательных аппаратов. URL: <https://www.ippe.ru/realized-projects/275-space-npp>
- [27] К 2025 году Россия построит космический аппарат с ядерным двигателем. URL: <https://fishki.net/1816612-k-2025-godu-rossija-postroit-kosmicheskij-apparat-s-jadernym-dvigatelem.html>
- [28] **Туманов А.Ю.** Автоматизированная система количественной оценки риска инновационного проекта: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006.
- [29] Буревестник (крылатая ракета). Материал из Википедии – свободной энциклопедии. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Буревестник_\(крылатая_ракета\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Буревестник_(крылатая_ракета))
- [30] **Туманов А.Ю.** Разработка системы поддержки принятия решения по оценке риска аварий на потенциально опасных объектах // Научно-технические ведомости СПбПУ. 2013. Вып. 2 (171). С. 289–299.
- [31] **Кудинович И.В., Овсянников Д.А., Свистунов Ю.А., Головкина А.Г.** Электроядерные технологии и ядерная энергетика. СПб.: Изд-во ВВМ, 2014. 143 с.
- [32] Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA publications and reports, 2002. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf> (дата обращения: 31.03.2019).
- [33] **Won S. Park, Tae Y. Song, Byoung O. Lee and Chang K. Park.** A Preliminary Design Concept of the HYPER System // Journal of the Korean Nuclear Society. 2002. Vol. 34, no. 1. P. 42–59.
- [34] Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste. Status report of IAEA, IAEA-TECDOC-985, 1996.
- [35] Status of accelerator driven systems research and technology development. – Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1766, 2015.
- [36] **Francesco Venneri, Mark A. Williamson, Ning Li, Michael G. Houts, Richard A. Morley, Denis E. Beller, William Sailor & George Lawrence.** Disposition of Nuclear Waste Using Subcritical Accelerator-Driven Systems: Technology Choices and Implementation Scenarios // Nuclear Technology. 2000. 132:1. P. 15–29. DOI: 10.13182/NT00-A3126
- [37] **Alex C. Mueller.** Transmutation of Nuclear Waste and the future MYRRHA Demonstrator. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.4297.pdf>
- [38] ITER. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [39] **Matt Jewell.** ITER conductor design and (we hope) nuclear heating. URL: http://www.hep.princeton.edu/mumu/target/Jewell/jewell_041511.pdf
- [40] **Tony Donné, Gianfranco Federici.** Overview of Design and R&D Activities towards a European DEMO. URL: https://www.iea.org/media/workshops/2016/fpccwebinar/Item_6_EUROPE.pdf
- [41] **Гуменюк В.И., Атоян Г.Л., Сыров А.А.** Обеспечение защищенности и минимизация затрат при перегрузке ядерного топлива для реакторов типа ВВЭР // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. Вып. 2 (123). С. 294–302.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГУМЕНЮК Василий Иванович – доктор технических наук профессор Высшей школы технической безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: kaf-uzchs@mail.ru

ТУМАНОВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук доцент Высшей школы технической безопасности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
E-mail: toumanov@mail.ru

АТОЯН Грант Леонович – научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН
E-mail: ato.bmg@gmail.com

Статья поступила в редакцию: 25.05.2019



REFERENCES

- [1] **L.M. Voronin**, Perspektivy razvitiya atomnoy energetiki Rossii v XXI veke. URL: http://www.wdcb.ru/mining/articles/art_3/perspect.html (accessed March 31, 2019).
- [2] **A.Yu. Gagarinskiy, Ye.P. Velikhov, S.A. Subbotin, V.F. Tsibulskiy**, Energetika v ekonomike 21 veka. RNTs «Kurchatovskiy institut». URL: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/050/43050825.pdf (accessed March 31, 2019).
- [3] Energetika budushchego. Mezhdunarodnyy projekt ITER. Pod red. akademika Ye.P. Velikhova. M.: UTS-Tsentr, 2005.
- [4] **Ye.P. Velikhov**, Energetika v ekonomike mira XXI veka, Trudy MFTI, 3 (4) (2011) 6–15.
- [5] **V.F. Tsibulskiy**, Energeticheskiy indikator sostoyaniya ekonomiki. Otkrytyy seminar «Ekonomicheskiye problemy energeticheskogo kompleksa» (seminar A.S. Nekrasova). M.: Izdatelstvo INP RAN, 2013.
- [6] **I.V. Kurchatov, A.P. Aleksandrov**, O strategii yadernogo energeticheskogo razvitiya. Sbornik. M.: NITs «Kurchatovskiy institut», 2013.
- [7] Strategiya razvitiya atomnoy energetiki Rossii v pervoy polovine XXI veka. Osnovnyye polozheniya. Ministerstvo Rossiyskoy Federatsii po atomnoy energii. M.: 2000.
- [8] Rol yadernoy energetiki v sovremennom mire. Bezopasnost i stoimost, YuNIDO v Rossii, 4 (2011). URL: http://www.unido-russia.ru/archive/num4/art4_18/ (data obrashcheniya: 31.03.2019).
- [9] **A.M., Belogoryev V.V. Bushuyev, A.I. Gromov, N.K. Kurichev, A.M. Mastepanov, A.A. Troitskiy**, Trendy i stsennariy razvitiya mirovoy energetiki v pervoy polovine XXI veka. Pod red. V.V. Bushuyeva. M.: ID «ENERGIYA», 2011.
- [10] **V.I. Gumenyuk, M.V. Gravit, G.L. Atoyan, V.Yu. Popov, I.Yu. Popov**, Problemy sovershenstvovaniya sistem monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy na obyektakh yadernoy energetiki, Nedelya nauki SPbPU sb. dokl. Nauchnogo foruma s mezhdunar. uchastiyem XLIII. SPb., (2014) 11–18.
- [11] **V.I. Gumenyuk, G.L. Atoyan, M.V. Gravit, V.Yu. Popov, I.Yu. Popov**, Razrabotka sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera po analizu obyemnoy aktivnosti izotopov ksenona, Opyt likvidatsii krupnomasshtabnykh chrezvychaynykh situatsiy v Rossii i za rubezhom: tez. dokl. XIX Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. po problemam zashchity naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy. (2014) 100–101.
- [12] **V.I. Gumenyuk, M.Ye. Fedosovskiy, G.L. Atoyan**, Printsipy i metody povysheniya zashchishchennosti sistem upravleniya kriticheski vazhnykh obyektov. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 147 (2) (2012) 209–225.
- [13] **V.I. Gumenyuk, M.V. Gravit, L.N. Sorokin, G.L. Atoyan**, Perspektivy razvitiya yadernoy energetiki Rossii i problemy bezopasnosti, Nedelya nauki SPbPU: mater, nauch, foruma s mezhdunar, uchastiyem «Mezhdistsiplinarnyye seksii i plenarnyye zasedaniya institutov», (2015) 203–224.
- [14] **U.K. Amirova, N.A. Urubayeva**, Obzor razvitiya mirovogo rynka urana, Universum: Ekonomika i yurisprudentsiya: elektron. nauchn. zhurn. 2017. № 6(39). URL: <http://7universum.com/ru/economy/archive/item/4802>
- [15] Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda. Institut energeticheskikh issledovaniy Rossiyskoy akademii nauk. Analiticheskiy tsentr pri Pravitelstve Rossiyskoy Federatsii. M., 2014. URL: <https://www.eriras.ru/files/prognoz-2040.pdf>
- [16] **Gordon B.G.** O numeratsii pokoleniy yadernykh reaktorov. Data: 31.01.2017. Tema: Bezopasnost i chrezvychaynyye situatsii. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7293>
- [17] Obshchiye polozheniya obespecheniya bezopasnosti atomnykh stantsiy. OPB AS, NP-001-15, M.: NTTs YaRB, 2016.
- [18] **V.V. Orlov, Ye.N. Avrorin, Ye.O. Adamov [i dr.]**, Netraditsionnyye kontseptsii AES s yestestvennoy bezopasnostyu, Atomnaya energiya, 72 (4) (1992).
- [19] **B.G. Gordon**, Bezopasnost yadernykh obyektov. M.: Izd. NIYaU «MIFI», 2014.
- [20] An Integrated Safety Assessment Methodology (ISAM) for Generation IV Nuclear Systems, Risk and Safety Working Group (RSWG), June 2011. URL: https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2013-09/gif_rsgw_2010_2_isamrev1_finalforeg17june2011.pdf
- [21] BREST. Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%A0%D0%95%D0%A1%D0%A2>

- [22] Реактор PIK. URL: <http://www.pnpi.spb.ru/ustanovki/reaktor-pik>
- [23] PIK (reaktor). Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_\(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%98%D0%9A_(%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80))
- [24] Akademik Lomonosov. Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Akademik_Lomonosov
- [25] **N.A. Zobnina, L.Yu. Zotova, A.Yu. Tumanov**, Otsenka predotvrashchennogo ushcherba pri radiatsionnoy avarii na PATES, Nedelya nauki SPbPU: mater. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiyem. SPb.: Izd-vo Politechnich. un-ta, (2018) 79–81.
- [26] Reaktory yadernykh energeticheskikh ustanovok dlya kosmicheskikh i letatelnykh apparatov. URL: <https://www.ippe.ru/realized-projects/275-space-npp>
- [27] K 2025 godu Rossiya postroit kosmicheskii apparat s yadernym dvigatelem. URL: <https://fishki.net/1816612-k-2025-godu-rossija-postroit-kosmicheskii-j-apparat-s-jadernym-dvigatелеm.html>
- [28] **A.Yu. Tumanov**, Avtomatizirovannaya sistema kolichestvennoy otsenki riska innovatsionnogo proyekta: dis. ... kand. tekhn. nauk. SPb., 2006.
- [29] Burevestnik (krylataya raketa). Material iz Vikipedii – svobodnoy entsiklopedii. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Burevestnik_\(krylataya_raketa\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Burevestnik_(krylataya_raketa))
- [30] **A.Yu. Tumanov**, Razrabotka sistemy podderzhki prinyatiya resheniya po otsenke riska avariyy na potentsialno opasnykh obyektakh, St. Petersburg polytechnic university journal, 2 (171) (2013) 289–299.
- [31] **I.V. Kudinovich, D.A. Ovsyannikov, Yu.A. Svistunov, A.G. Golovkina**, Elektroyadernyye tekhnologii i yadernaya energetika. SPb.: Izd-vo VVM, 2014.
- [32] Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles. A Comparative Study. NEA publications and reports, 2002. URL: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf> (accessed March 31, 2019).
- [33] **Won S. Park, Tae Y. Song, Byoung O. Lee and Chang K. Park**. A Preliminary Design Concept of the HYPER System, Journal of the Korean Nuclear Society, 34 (1) (2002) 42–59.
- [34] Accelerator Driven Systems: Energy Generation and Transmutation of Nuclear Waste. Status report of IAEA, IAEA-Tecdoc-985, 1996.
- [35] Status of accelerator driven systems research and technology development. – Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1766, 2015.
- [36] **Francesco Venneri, Mark A. Williamson, Ning Li, Michael G. Houts, Richard A. Morley, Denis E. Beller, William Sailor & George Lawrence**, Disposition of Nuclear Waste Using Subcritical Accelerator-Driven Systems: Technology Choices and Implementation Scenarios, Nuclear Technology, 132:1 (2000) 15–29. DOI: 10.13182/NT00-A3126
- [37] **Alex C. Mueller**, Transmutation of Nuclear Waste and the future MYRRHA Demonstrator. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1210/1210.4297.pdf>
- [38] ITER. From Wikipedia, the free encyclopedia. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [39] Matt Jewell. ITER conductor design and (we hope) nuclear heating. URL: http://www.hep.princeton.edu/mumu/target/Jewell/jewell_041511.pdf
- [40] **Tony Donné, Gianfranco Federici**, Overview of Design and R&D Activities towards a European DEMO. URL: https://www.iea.org/media/workshops/2016/fpccwebinar/Item_6_EUROPE.pdf
- [41] **V.I. Gumenyuk, G.L. Atoyan, A.A. Syrov**, Obespecheniye zashchishchennosti i minimizatsiya zatrat pri peregruzke yadernogo topliva dlya reaktorov tipa VVER, St. Petersburg polytechnic university journal, 2 (123) (2011) 294–302.

THE AUTHORS

GUMENYUK Vasilii I. – *Higher School for Technosphere Safety of Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: kaf-uzchs@mail.ru

TOUMANOV Aleksandr Yu. – *Higher School for Technosphere Safety of Peter the Great St. Petersburg polytechnic university*

E-mail: toumanov@mail.ru

ATOYAN Grant L. – *St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS*

E-mail: ato.bmg@gmail.com

Received: 25.05.2019