

ОНТОЛОГИЯ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ. НОВЫЕ КОНЦЕПЦИИ УПРАВЛЕНИЯ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

С.А. БОЯРКИН, Д.А. ЧЕГОДАЙКИН, П.Г. ЩЕДРОВИЦКИЙ

Авария на японской АЭС «Фукусима-1» вызвала широкую международную дискуссию о дальнейшей судьбе атомной энергетики. Многие СМИ поспешили представить эту дискуссию в формате деклараций о сворачивании атомной энергетики. Однако большинство стран, развивающих атомную энергетику (Финляндия, Словакия, Тайвань, Республика Корея, Бразилия, Аргентина), подтвердили планы по строительству новых энергоблоков. Новые страны – Турция, Вьетнам – также не отказываются от планов сооружения АЭС.

Почему же, несмотря на серьезную аварию в Японии, абсолютное большинство стран не предполагает сворачивать программы строительства АЭС? У человечества пока нет другого эффективного способа обеспечивать всевозрастающие потребности в энергии, не приводящего к увеличению выброса парниковых газов, кроме атомной энергетики.

Сокращение спроса на электроэнергию в результате мирового финансового кризиса оказалось кратковременным явлением (а в некоторых странах его и вовсе не было): финансовый ресурс вновь стал доступным, а энергоэффективность имеет вполне определенные пределы. Как было доказано английским экономистом Уильямом Стенли Джевансом на примере угля еще в XIX в., «история экономического и технологического прогресса показывает, что, делая процесс потребления ресурсов более эффективным, мы стимулируем рост, а не сокращение потребления этих ресурсов»¹.

И сегодня развитие энергосберегающих технологий, сокращающих расходы на энергию, фактически стимулирует ее потребление. Глобальная экономика растет, продолжаются индустриализация и урбанизация развивающихся стран, население мира увеличивается, и это неизбежно ведет к росту потребления энергии. По самым консервативным оценкам, развитие мировой экономики к 2050 г. потребует увеличения производства энергии более чем в два раза². При этом рост потребления в абсолютных показателях наблюдается даже в странах Евросоюза, добившихся значительных успехов в повышении энергоэффективности.

Все серьезные расчеты доказывают: значительное увеличение производства электроэнергии сегодня невозможно обеспечить толь-

ко за счет использования органического топлива и возобновляемых источников. Почему?

Органическое топливо имеет ограниченное предложение. Соответственно, попытка покрытия дефицита за счет массового ввода новых объектов генерации на органическом топливе приведет к скачку цен на него. Кроме того, электростанции на традиционном топливе наносят серьезный ущерб экологии — выбросы парниковых газов и канцерогенной пыли, зольные отвалы и т.п.

Возобновляемые источники энергии хотя и используют бесплатный ресурс (ветер, солнце, приливы и т.п.), не только не способны обеспечить производство электроэнергии в необходимых количествах, но и не могут работать в режиме базовой (постоянной) нагрузки для обеспечения надежного снабжения потребителей. Кроме того, сегодня эти технологии пока еще очень дороги в пересчете на киловатт установленной мощности.

В то же время себестоимость электроэнергии, произведенной на АЭС, существенно (до 40%) ниже, чем на традиционных ТЭС, несмотря на относительно более высокую цену установленного киловатта. Это обусловлено тем, что в общей стоимости электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, доля расходов на топливо составляет не более 10%, а для ТЭС — это 50 — 80%. Следовательно, даже если природный уран (доля которого в цене ядерного топлива составляет не более 50%) подорожает в два раза, стоимость электричества, вырабатываемого на АЭС, увеличится всего на 4 — 5%³.

Надо понимать, что тезис об экономической эффективности атомной энергетики справедлив только для определенного масштаба ее присутствия в экономике. Атомный киловатт-час — это продукт конечного передела целой отрасли. Инфраструктура, необходимая для его производства, столь объемна, сложна и дорога, что вся цепочка рентабельна только в том случае, если количество энергоблоков исчисляется десятками. Все компании, у кого больше 50 действующих энергоблоков, продолжают развиваться — строить новые блоки. Остальные выбыли из игры. Если сейчас отдельные европейские страны (в первую очередь, Германия) свернут ядерные программы, то практически навсегда закроют для своих компаний вход в пул поставщиков решений для атомной энергетики.

В настоящее время «Росатом» в России и за рубежом строит 14 энергоблоков. Восстановление способности вести одновременное сооружение такого количества объектов — это один из реальных эффектов от принятой в 2006 г. Федеральной целевой программы «Развитие атомного энергопромышленного комплекса России на 2007 — 2010 годы и на перспективу до 2015 года». Несмотря на то, что

кризис внес коррективы в ФЦП (реализация ее сместилась вправо во времени), заданный этой программой мощный импульс позволил России в 2006 – 2008 годы не отстать от конкурентов, а с 2008 г. – усилить наше предложение за рубежом.

Наиболее распространенной в мире (две трети установленной мощности) технологией энергетических реакторов является PWR (Pressurized Water Reactor – реактор с водой под давлением). Абсолютное большинство, 55 из 65, сооружаемых в настоящее время в мире энергоблоков также относятся к технологии PWR. Российский вариант этой технологии называется ВВЭР – водо-водяной энергетический реактор.

Очевидно, что главное последствие аварии в Японии – очередное усиление требований к безопасности АЭС. Энергоблоки, сооружаемые сегодня Россией и ключевыми мировыми компаниями, относятся к так называемому поколению III/III+, которое существенно отличается от АЭС предыдущих поколений.

Чем определяются затраты на сооружение АЭС? Энергоблок АЭС – очень сложный инженерный объект, состоящий из порядка миллиона «деталей», поэтому рассчитать его полную («до гвоздя») стоимость не так-то просто. Опыт сооружения других сложных инженерных объектов – буровых платформ – подсказывает иной подход к планированию затрат: какой угодно сложности объект может быть разложен на счетное число «элементарных» составляющих-ресурсов: кубометры бетона разных марок, тонны стали разных сортов, километры кабеля и трубопроводов основных типов плюс количество человеко-часов рабочих разных квалификаций.

Соответственно, можно выделить два ключевых «внутренних» фактора, определяющих экономику сооружения энергоблока: продолжительность сооружения и объем необходимых «элементарных» ресурсов⁴. Почему так важен срок сооружения? В строительстве АЭС участвуют сотни подрядчиков, а численность рабочих на стройплощадке может достигать нескольких тысяч человек. Также применяется много тяжелой, подчас уникальной (следовательно, очень дорогой) техники. Таким образом, срок сооружения определяет прямые расходы, связанные с содержанием рабочих и техники на площадке (плюс проценты по кредитам). Срок сооружения определяет также и размер недополученной выручки: чем позже ввод в коммерческую эксплуатацию, тем позже АЭС начинает генерировать положительный денежный поток (ежедневно энергоблок на 1 ГВт вырабатывает электроэнергии примерно на 24 млн. руб. при цене на оптовом рынке 1 тыс. руб./МВт·ч).⁵

Действующий в настоящее время отраслевой норматив продолжительности сооружения энергоблока – 60 месяцев от начала

заливки бетона в фундамент («первый бетон») до «физического пуска» (загрузка топлива в реактор). При этом реальные сроки могут быть как существенно меньше, так и неограниченно больше. Минимальный срок — 38 месяцев — достигнут при сооружении 5-го энергоблока Запорожской АЭС в 1988 г.⁶ Очевидно, что в этом направлении есть к чему стремиться.

Рассмотрим второй фактор — объем «элементарных» ресурсов. На первый взгляд, чем меньше требуемый объем ресурсов, тем дешевле должно быть сооружение энергоблока. Однако не все так просто. Особенность АЭС состоит в том, что объем и качество необходимых для ее сооружения «элементарных» ресурсов определяются принятой концепцией безопасности.

Системы безопасности на АЭС поколения III/III+ носят глубоко эшелонированный характер и характеризуются: независимостью, многократным резервированием, физическим разделением каналов, по которым поступают информационные и управляющие сигналы. Системы безопасности бывают активными, например, электроуправляемые задвижки на трубопроводах. В последние годы все большую популярность приобретают так называемые пассивные системы, которые основаны на использовании естественных законов природы (гравитация, естественная циркуляция, испарение). Преимущество использования принципов «естественной безопасности» — независимость от внешних факторов (в том числе от внешнего энергоснабжения). В современном реакторе ВВЭР при повышении мощности, температуры или появлении пара за счет отрицательных обратных связей происходит самозаглушение реактора. Что особенно важно, пассивные системы начинают функционировать, как только температура поднимается выше заданного значения независимо от действий персонала. Действие пассивных систем можно сравнить с автомобилем, который при выключении двигателя под действием инерции может продолжать ехать вниз с горы, но никак не в гору.

Кроме того, современные АЭС оснащаются специальными системами защиты от тяжелых аварий (ловушка расплава), при этом реактор располагается внутри контаймента с двойной герметичной оболочкой, способной выдержать значительные внешние воздействия, включая падение самолета. Усиление безопасности оказало прямое влияние на стоимость энергоблока: только за период с 1966 по 1976 гг. фактическая стоимость 1 кВт установленной мощности АЭС в США выросла почти в 4 раза (до 4 тыс. долл.). В 2010 году на территории США она по разным оценкам достигла 5,5 — 6 тыс. долл. за кВт⁷.

Какие из всего этого следуют выводы?

Повышение требований безопасности, скорее всего, приведет к тому, что часть новых проектов строительства сдвинется «вправо» (до проведения экспертиз на соответствие проектов новым, более жестким требованиям безопасности).

Энергоблоки II поколения будут ускоренно выводиться из эксплуатации, что в ряде стран приведет к замещению их новыми блоками АЭС III/III+.

Страны-«новички» будут в основном предъявлять спрос на проекты, основанные на принципах BOOT (Build – Own – Operate – Transfer, «Строительство – Владение – Эксплуатация – Передача»), когда поставщик берет на себя всю полноту ответственности за безопасную эксплуатацию энергоблока в течение установленного контрактом срока (как правило, не менее срока окупаемости). Фокус на безопасности не только не снимает с повестки дня вопрос стоимости энергоблока, но даже обостряет его: в проектах по схеме BOOT в оптимизации затрат (при сохранении заданного уровня безопасности) будет заинтересован не только заказчик, но и сам поставщик, поскольку он несет все технические и финансовые риски в течение срока, достаточного для выявления возможных погрешностей в проектировании или сооружении АЭС. Более того, такая схема делает очевидным тезис, что технические решения, принимаемые на стадии проектирования и конструирования, влияют не только на стоимость сооружения энергоблока, но и на стоимость последующих этапов (эксплуатация, модернизация /включая продление сроков/, вывод из эксплуатации). Фактически продуктом становится не сам энергоблок, а система управления его жизненным циклом (который с учетом вывода из эксплуатации превышает 100 лет).

Изменение представления о сложном инженерном объекте как продукте инженерной деятельности изменило представление о самом содержании этой деятельности. Этому предшествовало осознание нескольких ключевых тенденций в инженерной практике, оформившихся в последние несколько десятилетий. Сложность создаваемых инженерами объектов и систем возросли на порядок, соответственно, кратно увеличилась стоимость разработок и требования к компетенциям разработчиков. В результате уже невозможно создать современный авиационный двигатель (не говоря уже о более сложных системах вроде АЭС или буровой нефтегазовой платформы), используя ресурсы только одного института или конструкторского бюро. В процесс вовлекается множество (до нескольких сотен и даже тысяч) организаций, которые одновременно – «распределенно» – участвуют в проектировании и сооружении данных объектов. Увеличение числа участников привело к тому, что

единицей планирования работ, принятия управленческих решений, формирования компетенций для глобальных проектов становятся коллективы от 25 до 200 человек (часть которых могут располагаться в разных организациях и даже разных странах). То есть разработчик сложного инженерного объекта понимается в терминах «расширенного предприятия» как созданная посредством системы контрактов мета-организация из ресурсов (людей, инструментов, материалов), участвующих в конкретном проекте различных юридических лиц.

Одновременно возникла задача интеграции данных в «расширенном предприятии». Отдельным юридически самостоятельным участникам невозможно предписать использовать программные средства одного поставщика. Более того, в силу очень высокой специализации на уровне разработок проблему интеграции данных в принципе невозможно разрешить за счет унификации софта. Решение этой проблемы наметилось за счет: разработки целостной онтологии проекта и его полного жизненного цикла, в рамках которой разнообразные данные и знания проекта заняли свое место; применения всеми участниками международных стандартов системной инженерии, в частности, стандарта интеграции данных ISO 15926.

Качественно изменилась связь между функциональными возможностями объектов и систем и глубиной их информатизации. В 60-х годах XX века примерно 7 – 8% функциональных возможностей истребителя F-4 обеспечивалось за счет информационных технологий. В истребителях пятого поколения F-35 примерно 90% функциональных возможностей обеспечивается за счет информационных технологий⁸.

Инструментарий конструирования и проектирования столь сложных объектов также претерпел качественное изменение: от плоских бумажных чертежей произошел переход к объемным электронным моделям, интегрирующим в себя помимо информации о физических характеристиках отдельных составляющих объекта информацию об организации работ по его производству / сооружению, включая поставки комплектующих и логистику человеческих ресурсов. Использование виртуальных макетов, информационных моделей, датацентрических репозиторий проектной информации обеспечивает выявление коллизий при «виртуальной сборке», т.е. до выноса чертежей в материальную реальность в ходе действительно сооружения «в металле и бетоне» и пуска в эксплуатацию. Связь моделей и реальности через использование штрих-кодов или RFID позволяет легче снимать коллизии между описаниями системы и самой системой, т.е. между тем, что запроектировано, и тем, что существует в реальности (описания *as designed* и *as build*). Кроме

того, современные инструменты позволяют обеспечить связь всех состояний системы как в прямом направлении (например, передача рабочей документации на стадию сооружения), так и в обратном (например, учет данных по надёжности уже эксплуатируемых систем на стадии проектирования новых).

Значительное количество объектов инфраструктуры, созданной человечеством после Второй мировой войны, неуклонно приближаются к завершению проектного срока службы. Это относится к электростанциям, трубопроводным системам, мостам, железным дорогам, плотинам и даже целым городам. Подтверждение тому — большинство происходивших в последнее время техногенных аварий.

Старение техносферы — естественный и неизбежный процесс, и это главный вызов человечеству на ближайшие несколько десятков лет. Включиться в управление развитием и старением объектов и безопаснее, и выгоднее в экономическом плане, чем реагировать на последствия этих процессов постфактум (восстанавливать разрушенный объект после аварии). Очевидный пример — деятельность по продлению жизненного цикла. По сравнению с запланированным на начальном этапе, фактический жизненный цикл может быть длиннее в разы. И вопрос не только в продлении безопасного функционирования объекта. Работы, связанные с реконструкцией, модернизацией и заменой оборудования, способствуют увеличению денежного потока компании, повышают ее долгосрочную устойчивость.

В свою очередь, эта деятельность поднимает на поверхность новые проблемы. Например, проектный срок эксплуатации АЭС поколения III/III+ составляет 60 лет и может быть увеличен до 80 лет и более, что превышает среднюю продолжительность человеческой жизни. Соответственно, к моменту очередного продления срока службы энергоблока никого из тех, кто его проектировал и соорудил, может уже не быть в живых. Параллельно сменится несколько поколений вычислительной техники, программного обеспечения, носителей и способов записи информации.

Кроме того, любая техническая система конечна, т.е. рано или поздно она должна прекратить свое функционирование. По уровню решаемых задач вывод из эксплуатации является одним из самых сложных видов деятельности. Спектр проблем чрезвычайно широк: от устаревших (или утраченных) чертежей до неготовности объекта к выводу из эксплуатации по причине того, что он в принципе не проектировался для этого.

Сейчас появляется все больше проектов, которые разрабатываются с учетом требований нулевого воздействия на среду. Уже

существуют прецеденты нормативного закрепления соответствующих обязательств: вводятся требования к строительству сложных технических сооружений, в которых вывод из эксплуатации и привод к «серым лужайкам», «зеленым лужайкам» заложен на уровне законодательства.

Все вышеперечисленное подводит нас к выводу, что от единичных изолированных объектов мы переходим к глобальным системам с неопределенными границами. Проектирование сдвигается от технических объектов к техноприродным и человеко-машинным системам, поскольку при проектировании и сооружении сложного инженерного объекта (например, АЭС) необходимо учитывать массу нетехнических факторов в первую очередь социальных. Это связано с тем, что спектр заинтересованных сторон, чьи требования к объекту или системе необходимо учитывать, существенно расширился по сравнению с тем, как было принято думать раньше. И сами требования стали очень многоаспектны, многогранны.

Учет этих (и многих других) тенденций требует совершенно иного подхода к планированию сложного инженерного объекта (или системы) и управлению информацией о различных этапах его создания и функционирования. Вопрос управления всем жизненным циклом объекта выходит на первый план.

Федеральная целевая программа «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010 – 2015 годов и перспективу до 2020 года» открывает принципиально новый этап эволюции энергетических ядерных установок. Основная идея – создание энергоблока четвертого поколения, максимально использующего принципы «естественной безопасности», и *замкнутого ядерно-топливного цикла* (ЗЯТЦ). Это предполагает объединение жизненных циклов энергоблока и ядерного топлива.

Цели проекта: сокращение объемов *отработавшего ядерного топлива* (ОЯТ) и *радиоактивных отходов* (РАО), достижение приемлемых для общества и экономики экологических характеристик ЗЯТЦ. Основными элементами инфраструктуры ЗЯТЦ будут являться реакторы на быстрых нейтронах, промышленные мощности по переработке ОЯТ и фабрики смешанного уран-плутониевого топлива, а также объекты окончательной изоляции РАО. Экспериментальной базой для отработки решений по технологиям переработки будут сооружаемые на площадке ФГУП «ГХК» Опытно-демонстрационный центр (ОДЦ) и Полифункциональный радиохимический комплекс (ПРК) на площадке ОАО «ГНЦ НИИАР».

В рамках решения проблемы окончательной изоляции РАО (Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиацион-

ной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года») Госкорпорацией «Росатом» начат проект сооружения первоочередного объекта окончательной изоляции для захоронения долгоживущих ВАО и САО. Сегодня проект создания ЗЯТЦ на быстрых реакторах является проектом, пока не имеющим аналогов в мировой ядерной энергетике.

Принятие решений на основе целостного видения всех аспектов жизненного цикла сложной технической системы требует обеспечения высококвалифицированными инженерными кадрами, которые помимо глубокого понимания объектов своей деятельности будут обладать компетенциями системного анализа, системного проектирования, системного синтеза знаний. Даже к классическим знаниям и умениям инженеров новые условия деятельности предъявляют новые требования: в частности, требования по углубленной специализации, требования дополнительного образования на фоне базового технического образования. При этом надо понимать, что поскольку технологии обновляются непрерывно, то и обучаться придется в течение всей жизни.

Непрерывно повышаются требования к инженеру в части его подготовки к управленческой деятельности, в частности к способности не просто придумать, а скоординироваться, сконфигурировать разные практики и коллективы для решения задачи. Способность к кооперативной деятельности становится одной из ключевых, эта компетенция порой бывает важнее, чем собственно понимание базового процесса. Обязательным требованием к подготовке современного инженера становится экономическая составляющая, а именно инвестиционное понимание жизни объектов, проектирование объекта по заданной стоимости и умение управлять совокупной стоимостью владения на всех стадиях жизненного цикла.

Таким образом, реальную повестку дня российской атомной отрасли составляют сегодня три пункта: 1) широкое внедрение идеологии управления жизненным циклом как общего подхода, увязывающего вопросы безопасности и экономичности, 2) создание ЗЯТЦ и реакторов четвертого поколения, 3) внедрение новой модели подготовки кадров для обеспечения решения вышеуказанных задач.

Аристотель сказал, что благо везде и повсюду зависит от соблюдения двух условий. Первое — от правильно установленных конечных целей, и второе — от отыскания соответствующих средств, ведущих к конечным целям. У нас есть первое, и мы активно работаем над вторым.

¹ См.: Рабочие материалы проекта «Энергетический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу и стратегические интересы Госкорпорации «Росатом»».

² См. там же.

³ См. там же.

⁴ Конечно же, есть еще и «внешние» факторы: цены и доступность ресурсов на конкретном рынке, особенности площадки размещения, особенности нормативного регулирования в конкретной стране и т.п., но на них мы сейчас останавливаться не будем.

⁵ См.: <http://www.atsenergo.ru/>

⁶ См.: Рабочие материалы проекта «Энергетический форсайт Российской Федерации на долгосрочную перспективу и стратегические интересы Госкорпорации «Росатом»».

⁷ Материалы международного семинара «Экономическая оценка стоимости АЭС и других сложных объектов. Методология, практика, экономические модели». Лондон, 29 ноября – 3 декабря 2010 года.

⁸ Материалы международного семинара «Экономическая оценка стоимости АЭС и других сложных объектов. Методология, практика, экономические модели». Лондон, 29 ноября – 3 декабря 2010 года.

Аннотация

Без атомной энергетики в обозримом будущем не обойтись. Большинство стран, заявивших о своих программах в этой области, продолжат их реализацию. Новые реакторы будут более безопасны как в процессе эксплуатации, так и на всем жизненном цикле. Целостное представление о сложной технической системе на основе ее жизненного цикла формирует принципиально новые требования к подготовке инженерных кадров.

Ключевые слова: АЭС, Фукусима-1, атомная энергетика, ядерный реактор, энергоблок, энергобаланс, ядерная безопасность, возобновляемые источники энергии, органическое топливо, энергосбережение, естественная безопасность, управление жизненным циклом, сложный инженерный объект, инженерные практики, замкнутый ядерно-топливный цикл, отработавшее ядерное топливо, радиоактивные отходы, инженерное образование.

Summary

It's impossible to imagine the future without nuclear energy. So, the most of the countries declaring their programs in this area will continue its implementation. The new nuclear reactors will be safer both in operation and throughout the lifecycle. Holistic view on a complex technical system based on its lifecycle lays down new requirements for engineering education.

Keywords: NPP, Fukushima-Daiichi, nuclear energy, nuclear reactor, power unit, energy balance, nuclear safety, renewables, fossil fuels, energy saving, inherent security, lifecycle management, complex engineering object, engineering practice, closed nuclear fuel cycle, spent nuclear fuel, radioactive waste, engineering education.