

СТАТЬИ

УДК 621.039.546

АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Ишеков А.Г., Клинов Д.А. (Обнинский гос. техн. ун-т атомной энергетики),
Смирнова Л.С., Субботин С.А., Щепетина Т.Д. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)

Основными недостатками сегодняшней ядерной энергетики являются незамкнутый топливный цикл и вследствие этого образование огромного количества радиоактивных отходов и недостаточные показатели эффективности, надежности и безопасности атомных станций при необходимости автономно производить энергию в удаленных регионах при сложных климатических условиях, что особенно актуально для нашей страны. Практическим решением второй проблемы и шагом к частичному решению первой представляется ввод в энергосистему атомных станций малой мощности (АСММ). В соответствии с классификацией МАГАТЭ под АСММ подразумеваются энергоисточники эквивалентной электрической мощностью не выше 300 МВт [1]. Такая мощность делает АСММ пригодной для решения не только социальных, но и масштабных промышленно-хозяйственных задач энергоснабжения.

Основной недостаток АСММ — относительно высокие удельные капитальные затраты по сравнению с АЭС большой мощности (50—150 тыс. руб./кВт), вследствие чего существует мнение об их низкой экономической эффективности, даже несмотря на исключительные качества длительной автономности и существенно меньшие затраты на вывод из эксплуатации.

Экономическая эффективность АСММ. Посредством специально разработанного программного продукта NTC [2] для комплексной технико-экономической оценки различных проектов малой ядерной энергетики проанализируем на основе моделирования экономическую эффективность двух наиболее проработанных на сегодняшний день проектов АСММ, а именно АСММ с КЛТ-40С, уже прошедший предварительные этапы и получивший разрешение на внедрение, и АСММ с АБВ-6. Расчеты проводи-

ли для двух типов активных зон: вариант А — изначально предлагаемая активная зона, вариант В — модифицированная активная зона.

Усовершенствование изначально предлагаемых вариантов топливных загрузок связано с комплексными исследованиями возможности двукратного увеличения кампании реакторов посредством перехода на повышенную загрузку на основе диоксида урана без изменения конструкции активной зоны [3, 4].

Основные технико-экономические характеристики проектов следующие:

	АСММ с КЛТ-40С с АБВ-6	
Тепловая мощность реактора, МВт . . .	2×150	2×40
Коэффициент полезного действия, % . . .	23	22
КИУМ, % . . .	84	90
Топливо, вариант:		
А . . .	U(Al,Si) ₃ + силумин	Интер- металлид
В . . .	UO ₂	UO ₂
Масса загрузки, кг:		
А . . .	2200	480
В . . .	4296	2424
Обогащение по ²³⁵ U, %:		
А . . .	17	17
В . . .	20	8
Расход на собственные нужды, %:		
электроэнергии . . .	7	9
тепла . . .	2	3
Число перегрузок:		
А . . .	9	15
В . . .	5	7
Начальные капитальные вложения, млн руб.:		
А . . .	7350	2860
В . . .	8500	3108
Срок эксплуатации, лет . . .	40	50
Персонал АСММ, чел. . . .	50	30
Среднемесячная заработная плата, руб./чел. . . .	22 400	22 400
Число капитальных ремонтов . . .	4	5
Стоимость капитального ремонта,		

млн руб. . . .	1,4	0,84
Эксплуатационные издержки,		
млн руб./год . . .	1	0,33
Простой, ч/год . . .	720	720

Объем затрат на основных этапах ядерного топливного цикла таков: природный уран — 1400 руб./кг, конверсия — 336 руб./кг, обогащение — 3750 руб./кг е.р.р., изготовление ТВС — 6740 руб./кг, транспортировка отработавшего топлива — 1400 руб./кг.

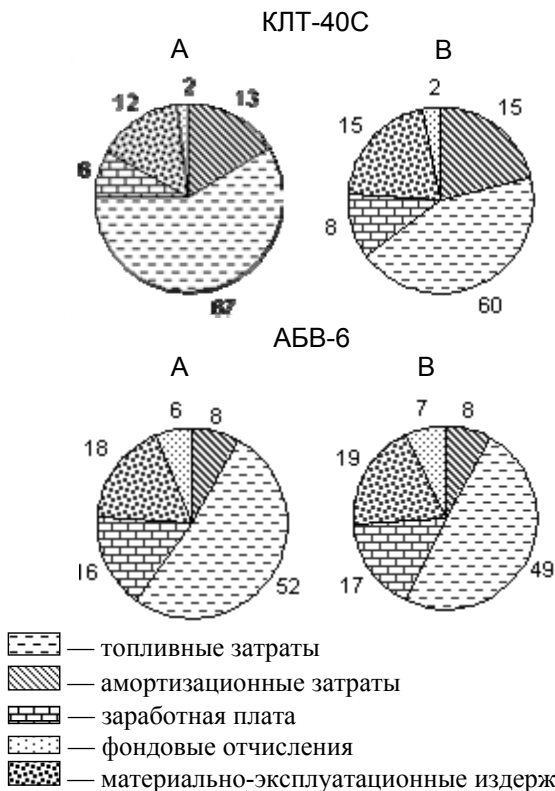
При моделировании эксплуатации рассматриваемых АСММ предполагался учет следующих положений: индексация заработной платы работников — 5% в год, годовой темп роста цен на топливо — 2%, заемные финансовые ресурсы не используются, ежегодные отчисления в фонды составляют 1,3 млн руб. (рис. 1).

Для увеличения кампании традиционного варианта активной зоны АБВ-6 в 2 раза повышена загрузка уранового топлива, но обогащение снижено с 17 до 8%. В результате среднегодовая себестоимость энергии различается, но не намного. Можно сказать, что стоимость дополнительной загрузки урана для варианта В компенсируется более высокими затратами на обо-

гащение топлива для варианта А. В случае проекта АСММ с КЛТ-40С для снижения числа перегрузок в 2 раза потребовалось не только увеличить массу загружаемого уранового топлива, но и повысить его обогащение до 20%. Если принять во внимание, что основной вклад в формирование себестоимости вносят топливные затраты (вариант А — 60%, В — 67%), значимое различие среднегодовой себестоимости энергии для обоих вариантов выглядит закономерным.

Как видно на рис. 1, среднегодовая себестоимость электроэнергии лежит в интервале от 1,15 руб./(кВт·ч) (вариант А — КЛТ-40С) до 1,65 руб./(кВт·ч) (вариант В — АБВ-6). Такая достаточно высокая себестоимость определяется, главным образом, стоимостью составляющих ЯТЦ, а также среднегодовым темпом роста цен на топливо. Принятые в исследовании затраты на основных этапах ЯТЦ соответствуют данным мирового рынка на ноябрь 2006 г. Цена на уран в последние годы значительно возросла. Учитывая долгосрочность рассматриваемых проектов АСММ, изменчивость конъюнктуры мирового рынка, относительно большие запасы урана, годовой темп роста цены на топливо принят равным 2%. Стоимость всех остальных этапов топливного цикла, учитывая отработанность технологических процессов, меняется незначительно.

Рост цены на топливо существенно сказывается на среднегодовой себестоимости энергии (табл. 1). Таким образом, рассматриваемые проекты АСММ более экономичны при вариантах с меньшей урановой загрузкой топлива и соответственно более короткой кампанией реактора. И чем больше мощность АСММ, тем экономически нецелесообразнее увеличивать кампанию. Однако экономическая эффективность модифицированного проекта АСММ с АБВ-6 с кампанией реактора 10 лет (вариант В) не намного уступает показателям изначально предлагаемого варианта этого же проекта. Поэтому разумно предположить, что для автономного энергоснабжения труднодоступных удаленных районов наиболее экономически эффективен вариант В проекта АСММ с АБВ-6. В этом случае дополнительные затраты на топливо могут компенсироваться значительно меньшими расходами на транспортные издержки, которые обычно велики, учитывая удаленность мест расположения автономных АСММ. При этом можно отметить, что завоз сразу всех реакторных блоков в



Р и с. 1. Расчетная среднегодовая себестоимость электроэнергии и тепла 1,4 и 1,1 руб./(кВт·ч), 1200 и 983 руб./Гкал для варианта АСММ с КЛТ-40С, 1,9 и 1,6 руб./кВт·ч, 1400 и 1200 руб./Гкал для варианта АСММ с АБВ-6

место дислокации АСММ, кроме экономической неоправданности, во многом не устойчив к требованиям нераспространения делящихся материалов. То же можно сказать и о вывозе отработавших свой срок реакторов.

Т а б л и ц а 1. Среднегодовая себестоимость электроэнергии при разных годовых темпах роста цен на топливо, руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$)

АСММ	Темп роста, %/год			
	0	2	5	10
КЛТ-40С:				
А	0,84	1,15	1,74	4,56
В	1,12	1,40	2,12	6,10
АБВ-6:				
А	1,29	1,57	2,49	8,76
В	1,34	1,65	2,63	8,62

Дальнейшее исследование экономической эффективности проекта АСММ с КЛТ-40С проводили на основе изначально предлагаемой топливной загрузки (вариант А), проекта АСММ с АБВ-6 — на базе усовершенствованной активной зоны (вариант В) как одного из перспективных вариантов автономной ЯЭУ.

Известно, что любой инвестиционный проект считается экономически эффективным, если его показатели удовлетворяют набору традиционных экономических критериев, а именно:

чистый дисконтированный доход должен быть больше нуля;

дисконтированный период окупаемости не должен превышать срок жизни проекта;

индекс прибыльности должен быть больше единицы;

внутренняя норма рентабельности должна превышать принятую расчетную ставку дисконтирования.

Эти же критерии были применены к оценке экономической эффективности проектов АСММ. Исходя из среднегодовой себестоимости были проанализированы отпускные цены на энергию в целях нахождения удовлетворяющих обозначенным критериям. Расчеты выявили минимальные цены на электроэнергию, при которых проекты считаются экономически эффективными. На основании полученных результатов можно заключить, что развертывание рассматриваемых проектов АСММ в центральной полосе страны, где цена на электроэнергию составляет около 1,5 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$), имеет мало шан-

сов на успех (табл. 2). Однако на северных территориях, особенно в удаленных труднодоступных и изолированных регионах с неразвитой инфраструктурой, они конкурентоспособны и по степени эффективности не уступают традиционным энергоисточникам. Например, на Сахалине в зонах децентрализованного и централизованного энергоснабжения тарифы составляют 11 и 3 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$) соответственно, в Камчатской области около 3,5 руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$). Кроме того, известно, что северные территории обладают высочайшим ресурсным потенциалом. Реализовать этот потенциал, а также существенно повысить степень экономической эффективности проектов АСММ можно путем создания надежных, автономных и многофункциональных ядерных энерготехнологических комплексов.

Т а б л и ц а 2. Минимально допустимые тарифные планы на электроэнергию, руб./($\text{кВт}\cdot\text{ч}$)

Ставка дисконтирования, %	АСММ с	
	КЛТ-40С	АБВ-6
3	2,52	3,36
6	3,36	5,04
12	5,6	9,24

Экономическая эффективность ядерных энерготехнологических комплексов. Ядерный энерготехнологический комплекс представляет собой энергопромышленный объект, состоящий из АСММ и сопряженного производственного комплекса по выпуску товарной продукции. Концепция ядерных энерготехнологических комплексов хотя и зародилась давно [5], должного развития не получила. Можно предположить, что эксплуатация АСММ в составе таких комплексов существенно повысит экономическую эффективность как АСММ, так и ядерных энерготехнологических комплексов. Геолого-географические особенности страны (преимущественно высокоширотное расположение) позволяют реализовывать различные варианты ядерных энерготехнологических комплексов относительно их хозяйственно-промышленной деятельности. Вот некоторые из вариантов когенеративных производств: опреснение воды, производство водорода, синтетических моторных топлив, сельскохозяйственной продукции, газификация угля, глубокая переработка полезных ископаемых, морефермы. В зависимости

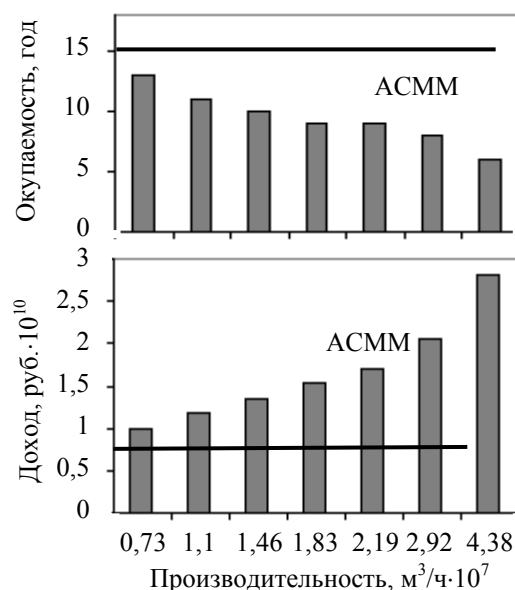
от региональных особенностей в ядерные энерготехнологические комплексы может входить несколько производственных единиц. Например, при рассмотрении случая акватории ядерный энерготехнологический комплекс может представлять собой следующее многофункциональное образование: АСММ—опреснительная установка—мореперерабатывающее предприятие. Таким образом используются все преимущества территориального расположения ядерных энерготехнологических комплексов.

Для оценки экономической эффективности ядерных энерготехнологических комплексов были исследованы несколько вариантов плавучего атомного энергоопреснительного комплекса, состоящего из АСММ с КЛТ-40С (вариант А) и обратноосмотической опреснительной установки. Все расчетные положения остались теми же, что использовались при анализе проектов АСММ. Выбраны следующие характеристики опреснительной установки: число опреснительных установок 2, энергопотребление 6 (кВт·ч)/м³, число работников 30 чел., эксплуатационные затраты 42 млн руб./год (табл. 3). Расчеты проводили на основе среднерыночной цены на воду 56 руб./м³, отпускной цены на электроэнергию 3,4 руб./(кВт·ч) (ставка дисконтирования 6%), при которой проект считается экономически эффективным (см. табл. 2).

Т а б л и ц а 3. Техничко-экономические характеристики опреснительных установок

Производительность, млн м ³ /год	Капитальные затраты, млн руб.	Энергопотребление	
		млн кВт·ч/год	% общей выработки
7,3	280	43,8	9,5
11,0	364	65,7	14,1
14,6	448	87,6	18,9
18,3	532	110	23,5
21,9	616	131	28,2
29,2	700	175	37,6
43,8	784	263	56,3

Как видно на рис. 2, при всех рассматриваемых вариантах производительности опреснительных установок плавучий ядерный энергоопреснительный комплекс эффективнее его базообразующего компонента АСММ. С увеличением производительности, т.е. преобразования большей части вырабатываемой энергии в по-



Р и с. 2. Зависимость дисконтированного периода окупаемости и чистого дисконтированного дохода от производительности плавучего энергоопреснительного комплекса

лезную продукцию, в данном случае в опресненную воду экономическая эффективность плавучего энергоопреснительного комплекса значительно возрастает. Так, в последнем случае, когда чуть более 50% вырабатываемой энергии используется на опреснение, чистый дисконтированный доход от плавучего энергоопреснительного комплекса в 4 раза выше, чем в случае АСММ.

Следует заметить, что рассматривается один из самых простых вариантов исполнения когенерационного комплекса, так как вода не самая рентабельная продукция, соответственно прибыль умеренная. Можно предположить, что добыча полезных ископаемых, создание морских ферм, некоторые инновационные технологические производства намного более рентабельны, чем опреснение воды. Производство воды может быть дополнено переработкой полученных в результате опреснения отходов и соответственно сопровождаться выработкой полезной химической продукции (хлорид натрия, калийные удобрения, сульфат кальция и др.).

Таким образом, стратегический и экономический потенциал АСММ можно значительно повысить при создании на их базе различных вариантов ядерных энерготехнологических комплексов, решая региональные, социальные и хозяйственные проблемы.

Реализация проектов АСММ. Объекты ядерной энергетики в отличие от энергоисточ-

ников другого рода обладают технологическими чертами, которые делают невозможным их реализацию подобно проектам традиционной энергетики. Ограничивающие факторы связаны, в основном, с безопасностью, нераспространением делящихся материалов и общественной приемлемостью. В связи с этим была выработана и принята нормативно-правовая база, касающаяся реализации проектов ядерной энергетики. Так, федеральным законом от 20 октября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» с изменениями от 11 ноября 2003 г. не предусмотрено частной собственности на объекты использования атомной энергии. Государство, в свою очередь, не имеет достаточных ресурсов как финансовых, так и управленческих для самостоятельного развития ядерной энергетики малой мощности.

Реализация проектов малой ядерной энергетики хорошо вписывается в рамки государственно-частного партнерства, сутью которого является осуществление государством и частными компаниями совместных энергетических проектов. Взаимоотношения сторон должны носить равноправный партнерский характер, что предполагает совместное инвестирование. Государство может предоставить в качестве ресурсов территорию, специалистов, благоприятные экономические условия для реализации проектов. Частная компания со своей стороны предоставляет финансовые ресурсы, опытных управляющих, технический и технологический инструментарий для управленческой деятельности. На сегодняшний день существуют, по крайней мере, два возможных организационно-экономических механизма реализации проектов АСММ, позволяющих учесть специфику ядерных технологий, — лизинг и схема строительство—передача—эксплуатация.

Идея лизинга состоит в том, что для получения дохода не обязательно иметь оборудование в собственности, достаточно иметь право на его использование и соответственно возможность извлекать доход от эксплуатации. По-видимому, применение этого механизма в области малой ядерной энергетики будет наиболее эффективным при исполнении экспортного варианта АСММ или ядерного энерготехнологического комплекса, например, при экспорте плывучего энергоопреснительного комплекса.

Еще одним из существующих на сегодняшний день механизмов, возможности которого

позволяют осуществить непосредственную реализацию и последующее сопровождение проектов малой ядерной энергетики, является схема строительство—передача—эксплуатация. Согласно этой схеме полностью или частично финансируемая инвестором инфраструктура, в данном случае АСММ или ядерный энерготехнологический комплекс, не может находиться в его частной собственности, а передается в собственность государству. Выгоды частного лица состоят в полной или частичной прибыли (в зависимости от договоренностей) от сбыта производимой продукции. В отличие от лизинга данный механизм наиболее эффективно работает внутри страны. Таким образом, уже сегодня есть пути реализации проектов малой ядерной энергетики с возможностью широкого привлечения частного капитала при учете нормативных ограничений, связанных с объектами ядерной энергетики.

Выводы. Итак, можно заключить, что развитие малой ядерной энергетики сдерживается не столько отсутствием технических решений, сколько неготовностью действующих экономических субъектов в должной мере оценить возможности и выгоды, появляющиеся при использовании новых технологических разработок, а также непроработанностью организационных и законодательных аспектов развития ядерной энергетики, в частности, связанных с собственностью в сфере ядерной технологии.

Предварительные расчетные оценки показывают, что воплощение в проектах АСММ инновационных технических разработок и последующая их реализация при отработанных организационно-экономических механизмах откроют возможности автономного и надежного энергообеспечения удаленных и изолированных регионов, способствуя их социально-экономическому развитию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs.* IAEA-TECDOC-1485, 2006.
2. **Ишеков А.Г., Субботин С.А., Щепетина Т.Д.** Комплексное исследование вопросов экономической эффективности и коммерциализации АЭС малой мощности: Препринт ИАЭ-6438/3, 2006.
3. **Алексеев П.Н., Кухаркин Н.Е., Полисмаков А.А. и др.** Перспективы, проблемы и возможности увеличения кампании ядерных «реакторов-батареек». — В сб.: Межд. научно-практ. конф. «Малая энергетика-2005». Москва, 11—14 октября, 2005, с. 144—153.

4. Полисмаков А.А., Чибиняев А.В., Цибульский В.Ф., Алексеев П.Н. Обоснование нейтронно-физических характеристик десятилетнего топливного цикла водородного реактора мощностью 40 МВт (т): Препринт ИАЭ-6272/4, 2003.
5. Алексеев П.Н., Забудько А.Н., Ошейко Ю.В. и др. Комплекс энерготехнологического обеспечения на основе автономных атомных энерготехнологических станций малой мощности (1—50 МВт эл.). — В сб.: Межд. научно-практ. конф. «Малая энергетика-2001». Москва, 10—11 октября, 2001, с. 69—70.

Поступила в Редакцию 20.02.07

УДК 621.039.546.8

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ И КОЛЕБАНИЙ ТВС ВВЭР-1000

Дроздов Ю.Н. (ИМАШ РАН), Тутнов А.А., Тутнов Ан.А., Алексеев Е.Е. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Макаров В.В., Афанасьев А.В. (ОКБ «Гидропресс»)

В условиях вибрации коррозионно-стойкие конструкционные сплавы могут подвергаться значительному повреждению в местах контакта деталей. Эти повреждения принято называть фреттинг-коррозией. Применительно к атомной технике фреттинг-коррозия впервые была обнаружена на дистанционирующих решетках твэлов PRTR (США) [1] как следствие вибрации и относительного перемещения элементов конструкции. Вибрация всегда возникает вследствие турбулентности потока и пульсаций давления теплоносителя. Характерная частота колебаний твэлов находится в интервале 80—150 Гц [2]. Проблема ограничения ресурса работы ТВС вследствие фреттинг-коррозии была успешно решена к концу 1970-х — началу 1980-х годов путем исключения относительных перемещений твэла и решетки [3]. Однако в настоящее время вновь возник практический интерес к исследованиям фреттинг-коррозии в связи с увеличением срока службы и надежности ТВС [4]. Лимит защиты от фреттинг-коррозии за счет простых конструктивных решений, предложенных ранее, исчерпан, и требуются новые решения.

Наиболее эффективным методом исследования фреттинг-коррозии является сочетание расчетных методов моделирования динамики ТВС в активной зоне с лабораторными экспериментами для определения стойкости металла. Повреждения при фреттинг-коррозии зависят от конструктивных и эксплуатационных параметров [5]:

геометрических и физических свойств узла сопряжения твэл—решетка (геометрия контакта, размер зазор—натяг, площадь соприкосновения и состояние трущихся поверхностей, объемная и поверхностная прочность материалов, динамический коэффициент трения, толщина оксидной пленки на трущихся поверхностях и др.);

давления в области контакта, амплитуды виброускорения и виброперемещения, частоты вибрационных колебаний.

Следовательно, методики моделирования поведения ТВС, твэлов и дистанционирующих решеток должны быть ориентированы на расчет этих параметров.

Экспериментальные исследования вибрационных характеристик ТВС и твэлов. Исследования виброхарактеристик полномасштабного макета ТВС проводили на воздухе при 20 °С при нагружении ударным молотком на электродинамическом вибростенде (рис. 1). Перед испытаниями макет ТВС устанавливали в опорный стакан и нагружали осевой сжимающей силой, соответствующей поджатию ТВС при рабочей температуре в реакторе. Вибрационная нагрузка прикладывалась к твэлам, дистанционирующим решеткам и опорам ТВС, вибрационный отклик ТВС измеряли посредством пьезоэлектрических акселерометров и 16-канального анализатора. Для обработки результатов использовали программное обеспечение Pulse LabShop (Дания).