

УДК 621.039.4.003

Ковецкая М.М., Лаврик В.М., Домашев В.Е.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ (ОБЗОР)

Розглянуто можливості використання ядерних реакторів для теплофікації міст.

Рассмотрены возможности использования ядерных реакторов для теплофикации городов.

Possibilities of use atomic electric power station for heat supply of cities are considered.

PWR – реактор с водой под давлением;
АСТ – атомная станция теплоснабжения;
АТЭЦ – атомная теплоэлектроцентраль;

РУ – реакторная установка,
ППУ – пенополиуритан.

Несмотря на многолетний опыт использования ядерной энергии для теплоснабжения прилегающих к АЭС населенных пунктов, существенного проникновения ядерной энергетики на коммерческий рынок теплоснабжения пока не произошло. В настоящее время в мире доля атомного теплоснабжения составляет менее 1 %, в то время как доля атомной электроэнергии – 15 %. Это связано с рядом объективных причин:

- приближение ядерного источника тепла к потребителям потребует принятия населением доказательного обоснования его ядерной и радиационной безопасности;

- экономическая не конкурентоспособность ядерных источников тепловой энергии по сравнению с традиционными при низких ценах на органическое топливо.

В Украине рассматриваются вопросы атомного теплоснабжения как на базе существующих АЭС, так и на базе специализированных атомных энергоисточников. В настоящее время осуществляется теплоснабжение прилегающих городов-спутников от действующих АЭС. Кроме того, разрабатывается проект теплоснабжения правобережной части г. Запорожья (общей численностью населения 265 тыс. чел) от ЗАЭС [1]. Проектом предусмотрено строительство тепловой подстанции для нагрева сетевой воды паром из нерегулируемых отборов турбин, основного магистрального теплопровода

протяженностью 55 км диаметром 2ДУ900 мм в ППУ изоляции и двух насосных подстанций. Ориентировочная стоимость проекта 2 млрд. грн., срок окупаемости несколько лет с учетом динамики роста цен на газ. Отмечаются следующие преимущества проекта: уменьшение потребления природного газа на 300-320 млн м³ в год (на 37 % общего объема потребления газа), уменьшение вредных выбросов в атмосферу, снижение тарифа на тепловую энергию.

В ряде европейских стран, развивающих атомную энергетику, реализуются проекты по организации теплоснабжения на базе существующих АЭС при значительной удаленности (до 100 км) потребителей тепловой энергии (проект теплоснабжения г. Хельсинки от АЭС «Лавиза», находящейся на расстоянии 75 км; г. Санкт Петербурга от Ленинградской АЭС-2, находящейся на расстоянии 70 км). Проект теплоснабжения г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области от ЛАЭС-2 предусматривает снижение на 30 % тарифов на тепловую энергию после окончания срока окупаемости проекта, снижение потребления природного газа на 5 млрд м³ в год, снижение выбросов парниковых газов на 8,5 млн т/год. В целом оценка потенциальной возможности получения эффекта от теплоснабжения всех Российских городов, расположенных в пределах 130 км от АЭС, составляет: экономия газа 56 млн. т. у.т./год, снижение выбросов парни-

ковых газов 84,9 млн. т./год, снижение выбросов оксидов азота 70,7 тыс. т./год [2].

Рассматриваются проекты атомного теплоснабжения на базе строительства АТЭЦ и АСТ с ядерными реакторами малой мощности и повышенной безопасности, которые могут располагаться в непосредственной близости от потребителя. В мире ведутся разработки более 50 инновационных проектов ядерных реакторов малой и средней мощности многоцелевого назначения: для производства электроэнергии, теплофикации, опреснения морской воды и производства водорода [3]. Основные предпосылки строительства АТЭЦ:

- необходимость ввода замещающих мощностей при исчерпании срока службы оборудования на действующих ТЭЦ;

- сокращение потребления дорогого органического топлива;

- необходимость сокращения вредных выбросов в окружающую среду;

- наличие на приемлемом расстоянии (не ближе 3 км) от границ перспективной застройки города площадки для строительства АТЭЦ.

Энергоблоки АТЭЦ должны удовлетворять требованиям повышенной безопасности для размещения вблизи крупных городов, экономической конкурентоспособности, экологической чистоты, ограничения электрической мощнос-

ти (не более 300 МВт) [4]. Это делает необходимой разработку специально ориентированных на АТЭЦ реакторных установок. Решение проблемы высокой (фактически гарантированной) безопасности связывают с введением инноваций в конструкцию реакторной установки. Для реакторов с водой под давлением инновации связаны с интегральной компоновкой реакторной установки, при которой все оборудование первого контура размещается внутри корпуса реактора, что обеспечивает более высокую безопасность по сравнению с петлевыми схемами. Для кипящих реакторов инновации связаны с максимальным упрощением конструкции энергоблока, переходом на естественную циркуляцию теплоносителя, применением пассивных систем безопасности. При этом модульный подход и заводское исполнение реакторной установки способствует снижению капитальных затрат при строительстве.

Для АТЭЦ разработаны инновационные проекты реакторных установок повышенной безопасности, модульного типа, интегральной компоновки. В табл. 1 представлены технические характеристики наиболее перспективных реакторных установок.

Схема охлаждения кипящего реактора ВК-300 одноконтурная с естественной цир-

Табл. 1

Наименование реакторной установки, страна разработчик	ВК-300 Россия	ВБЭР-300 Россия	SMART Р. Корея	IRIS США
Тепловая мощность, МВт	750	850	330	1000
Электрическая мощность, МВт	250	275	100	335
Давление в 1 контуре, МПа	6,8	15,7	15	15,5
Температура на выходе из реактора, °С	285	332	310	330
Параметры пара II контура давление, МПа	–	6,38	3	5,8
температура, °С	–	305	274	–
КПД, %	33,3	32,3	30,3	33,5
Срок службы корпусного оборудования, лет	60	60	60	60
Удельные капитальные затраты, дол/кВт	1520	1080	1800	1200

куляцией теплоносителя, охлаждаемые водой под давлением реакторы ВБЭР-300, SMART, IRIS двухконтурные с принудительной циркуляцией теплоносителя. Независимо от тепловой схемы реакторной установки (однорядной или двухконтурной) по требованиям радиационной безопасности сетевая вода циркулирует только в третьем, по отношению к активной зоне реактора, контуре и давление в контуре греющей воды всегда ниже давления в контуре сетевой воды.

По уровню безопасности и экономическим показателям конкурентоспособным является проект АТЭЦ с реакторной установкой ВБЭР-300 электрической мощностью 150, 230, 300 МВт в зависимости от числа петель первого контура (2, 3, 4), созданной на базе технологий судовых атомных реакторов [5]. Технические характеристики реактора с четырехпетлевым контуром представлены в табл. 1, схема РУ на рис. 1.

Энергоблок АТЭЦ с турбиной Т-275/200-60/50 может обеспечить производство электроэнергии 275 МВт при работе турбины в конденсационном режиме или 200 МВт электроэнергии и 1930 ГДж/ч теплоты при работе

в теплофикационном режиме. Блочная компоновка РУ, когда корпус реактора, парогенераторы и ГЦН соединены короткими патрубками, исключает трубопроводы большого диаметра, а вместе с ними и аварии с большими течами теплоносителя. Используется прямоточный змеевиковый парогенератор с движением теплоносителя второго контура внутри труб. Реакторная установка размещается в двойной защитной оболочке: герметичная внутренняя стальная оболочка, рассчитанная на избыточное давление 0,4 МПа; железобетонная внешняя. Результаты анализа радиационного воздействия на окружающую среду при проектных авариях показывают, что санитарно-защитная зона может быть ограничена площадкой АТЭЦ. Экономическая оценка показала, что двухблочная АТЭЦ имеет удельные капитальные затраты на сооружение 1080 дол./кВт, срок окупаемости 7 лет.

На базе реактора SMART разработан проект АТЭЦ, предназначенной для обеспечения электроэнергией, теплом и опресненной водой типичного корейского города с населением 100 тыс. жителей [6]. Реактор SMART тепловой мощностью 330 МВт (табл. 1) характеризуется существенным уменьшением нейтронного потока на корпус реактора в результате установки отражателей между активной зоной и корпусом. Вместе с тем отсутствие внешнего страховочного корпуса снижает уровень безопасности реакторной установки. Стоимость производства электроэнергии оценивается в 0,04 дол./кВт·ч при коэффициенте использования 80 % и процентной ставке на капитал 8 %. Стоимость опресненной морской воды составит 0,73...0,83 дол./м³, что меньше мировых цен (1 дол./т) [7]. По энергетической эффективности и надежности этот проект наименее привлекателен.

Разработан проект реакторной установки с реактором IRIS многоцелевого назначения [8]. Стальной отражатель, окружающий активную зону в опускном участке корпуса реактора, вместе с большим объемом воды в опускном канале служит дополнительной экранирующей

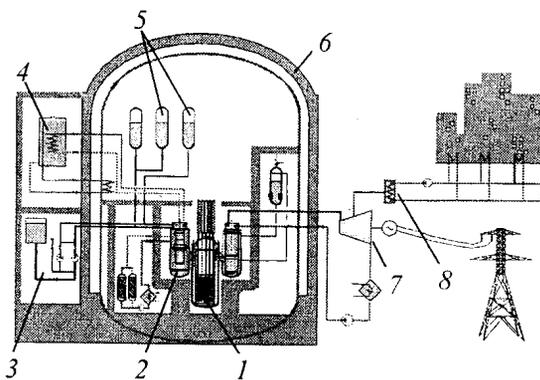


Рис. 1. Схема реакторной установки ВБЭР-300: 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – система очистки и расхолаживания; 4 – пассивная система аварийного расхолаживания; 5 – гидроаккумуляторы; 6 – защитная оболочка; 7 – турбогенераторная установка; 8 – теплообменник сетевой воды.

щей оболочкой, что позволяет значительно снизить флюэнс нейтронов на корпус реактора и радиационное поле за пределами корпуса. Проект реакторной установки предусматривает наличие сферического металлического контейнента диаметром 25 м, рассчитанного на давление 1,3 МПа, является наилучшим по уровню безопасности, энергетической эффективности и приемлемым по удельным капитальным затратам на сооружение. Сооружение АТЭЦ на базе IRIS предполагается в 2012–2015 г.

Высокий уровень безопасности для населения обеспечивает размещение реактора ВК-300 вместе с турбинной установкой под единой вторичной защитной оболочкой, что позволяет локализовать все последствия нарушения эксплуатации и аварийных ситуаций в пределах площадки АТЭЦ и разместить ее в непосредственной близости от населенного пункта. Номинальная электрическая мощность турбины Т-150/250-6,650 в теплофикационном режиме 143 МВт при температурном графике теплоснабжения 150/70 °С, максимальная электрическая мощность в конденсационном режиме 250 МВт, максимальная тепловая нагрузка 1680 ГДж/ч. Для аналогичного уровня мощности это самый дорогой проект по удельным капитальным затратам. Оценки показывают, что даже при цене газа 60 дол./1000 м³ себестоимость отпускаемой АТЭЦ электроэнергии будет в 1,42 раза, а теплоты в 1,67 раз меньше, чем ТЭЦ на природном газе [9]. Главным объектом сооружения АТЭЦ с ВК-300 является Архангельская АТЭЦ, создаваемая на основе государственно-частного партнерства [10].

Реакторные установки малой мощности для нужд теплофикации разрабатываются также в Японии (MRX), Франции (NP-300), Бразилии (FBNR), Италии (MARS). Преимуществом АТЭЦ является комбинированная выработка двух видов энергии, высокая степень использования мощности реактора в течение года, высокие выходные параметры теплоносителя. Вместе с тем, требования

повышенной безопасности при размещении АТЭЦ на небольшом расстоянии от населенного пункта, ограничения по величине теплового сброса усложняют строительство АТЭЦ.

Разрабатываются проекты АСТ для теплофикации городов и населенных пунктов: в России на базе реактора RUTA-70, в Японии – на базе реактора PFPWR-50. Реактор бассейнового типа RUTA тепловой мощностью от 10 до 70 МВт [11] предназначен для выработки низкопотенциальной тепловой энергии. В качестве преимуществ реакторной установки отмечается высокий уровень безопасности, который достигается благодаря:

- отсутствию избыточного давления теплоносителя в первом контуре (бассейне реактора);
- наличию большой тепловой аккумулирующей емкости воды в бассейне;
- низкой энергонапряженности активной зоны;
- трехконтурной системе передачи теплоты потребителю при минимальном давлении воды в первом контуре.

На рис. 2 представлена тепловая схема включения АСТ с RUTA-70 в систему централизованного теплоснабжения.

Радиационное воздействие на окружающую среду не превышает уровня естественной радиации и поэтому реакторная установка может

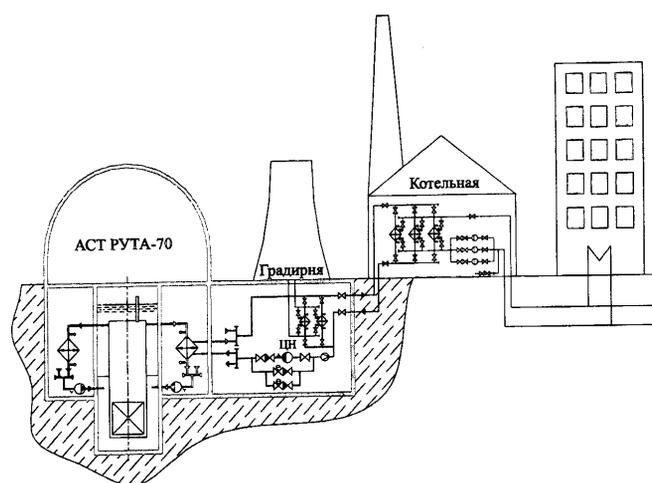


Рис. 2. Схема подключения установки RUTA-70 в систему теплоснабжения.

располагаться в непосредственной близости от потребителя в черте города. Об этом свидетельствует опыт работы 225 реакторов такого типа в мире. Однако максимальное значение температуры сетевой воды, подаваемой потребителю от АСТ с реактором RUTA, составляет 95 °С. Поэтому использование реакторной установки предпочтительно в базовой части графика тепловой нагрузки. Для покрытия пиковых тепловых нагрузок используются тепловые источники, работающие на органическом топливе. Удельные капитальные затраты на сооружение реакторной установки составляют 730 дол./кВт, срок окупаемости 8 лет. Преимуществами АСТ с реактором RUTA являются меньшие требования к уровню безопасности из-за пониженных технологических параметров теплоносителя и компактности установки. Однако неравномерная загрузка реактора в течение года существенно снижает коэффициент использования мощности, а необходимость строительства пиковой мощности на органическом топливе существенно снижает экономические и экологические показатели по сравнению с АСТ на базе реакторов с водой под давлением.

В Японии разработан реактор PFPWR-50 с водным теплоносителем типа PWR для нужд теплоснабжения и горячего водоснабжения [12]. Особенностью реактора является использование в качестве топлива шаровых тепловыделяющих элементов, применяемых в высокотемпературных газовых реакторах, которые способны удерживать продукты деления длительное время при температуре до 1600 °С. Тепловая мощность реактора 50 МВт, температура воды теплофикационного контура 130 °С. Все системы реакторной установки кроме пассивной системы расхолаживания расположены под защитной оболочкой. Оборудование и конструкции реакторной установки проектируются в расчете на максимальное проектное землетрясение. Для улучшения экономических показателей энергоблока малой мощности разработчики добились максимального упрощения систем. Так, при использовании выгорающих

поглотителей нейтронов удалось отказаться от более сложной системы регулирования реактивности жидким бором. Эксплуатационные расходы снижаются благодаря возможности работать в течение 10 лет без перегрузки топлива с начальным обогащением топлива по ^{235}U не более 5 %. Реактор может работать как в режиме базовой нагрузки, так и в режиме отслеживания нагрузки. Ожидается, что коэффициент использования мощности может достигать значения 0,7. Проект находится в стадии разработки, его осуществление намечено на 2015 г.

Выводы

1. Высокий уровень безопасности инновационных ядерных энергетических установок, используемых для теплоснабжения, достигается за счет их модульности, интегральной компоновки, внутренне присущих свойств безопасности и пассивных систем безопасности.

2. Использование атомных энергоисточников в теплоснабжении городов позволяет улучшить экологическую обстановку ввиду уменьшения вредных выбросов в атмосферу по сравнению с энергоисточниками на органическом топливе, ослабить зависимость от изменения цен на топливо из-за низкой топливной составляющей в себестоимости вырабатываемой продукции, сдерживать рост тарифов на тепловую энергию.

3. Для Украины в настоящее время перспективным является использование теплоты от действующих АЭС для теплоснабжения населенных пунктов в радиусе до 100 км. В более отдаленной перспективе возможно строительство блочно-модульных АСТ на базе инновационных ядерных реакторов, в том числе с подземным расположением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пузаков В.С. Европейский опыт организации теплоснабжения от АЭС// Новости теплоснабжения. – 2011. – № 2. – С. 49–56.
2. Шлапаков В.И. Транспорт тепла от АЭС

– требование времени, но сегодня – это дитя без няни // *Новости теплоснабжения.* – 2011. – № 2. – С. 44–48.

3. *Исаев А.Н.* Перспективы применения реакторов малой мощности с большой длительностью кампании // *Атомная техника за рубежом.* – 2007. – № 6. – С. 11–18.

4. *Кузнецов Ю.Н., Хрилев Л.С., Браилов В.П., Смирнов И.А.* Определение основных технических решений и эффективности развития атомной теплофикации // *Известия РАН. Энергетика.* – 2009. – № 3. – С. 3–26.

5. *Костин В.И., Петрушин В.В., Самойлов О.Б., Кураченко А.В.* Реакторная установка ВБЭР-300 и энергоблоки на ее основе для региональной ядерной энергетики // *Атомная энергия.* – 2007, Т. 102. – № 1. – С. 35–39.

6. *Chang M.N., Kim K.K., Yeo J.W.* Advanced Design Features Adopted in SMART / Small and Medium Sized Reactor: Status and Prospects. International Seminar held in Cairo, Egypt, 27-31 May 2001.

7. *Ковецкая М.М., Лаврик В.М., Ковецкий В.М.* Проблемы и перспективы использования малых и средних ядерных реакторов // Про-

блеми заглавной энергетики. – 2003. – № 9. – С. 32–36.

8. *Исаев А.Н.* Перспективы развития ядерной энергетики – реакторы средней и малой мощности // *Атомная техника за рубежом.* – 2007. – № 2. – С. 3–9.

9. *Габараев Б.А., Кузнецов Ю.Н., Роменков А.А.* Атомная теплофикация – перспективы и решения // *Атомная энергия.* – 2007. – Т. 103, № 1. – С. 36–40.

10. *Кузнецов Ю.Н.* Атомные когенерационные энергоисточники в региональной энергетике // *Новости теплоснабжения.* – 2011. – № 2. – С. 25–27.

11. *Баранев Ю.Д., Созонюк В.А., Роменков А.А., Ермошин Ф.Е.* Техническая возможность и эффективность применения атомных котельных в коммунально-бытовом теплоснабжении // *Теплоэнергетика.* – 2009. – № 12. – С. 65–68.

12. *Исаев А.Н.* Реактор с водным теплоносителем малой мощности с топливом на базе шариковых микротвэлов // *Атомная техника за рубежом.* – 2007. – № 8. – С. 14–20.

Получено 20.09.2011 г.