

Опреснение воды с использованием ядерной энергии

М.Г. Токмачев, Г.В. Токмачев

АННОТАЦИЯ

В обзоре рассмотрены проблемы использования АЭС для опреснения морской воды. Охарактеризован накопленный опыт и существующие планы ряда стран. Приведена информация из последних документов МАГАТЭ по этой проблематике. Рассмотрены вопросы безопасности, воздействия на окружающую среду и экономической привлекательности ядерно-опреснительных установок. Табл. 5, рис. 1, список лит. 5 назв.

Ключевые слова

Морская вода, опреснение, атомная станция, конкурентоспособность, безопасность, экология

Опреснение/обессоливание морской или грунтовой воды на 15 000 установках покрывает потребность человечества в питьевой воде в размере 40 млн. м³/сут. Основными потребителями являются ближневосточные и североафриканские страны. Однако существующие мощности заметно ниже необходимого, чтобы покрыть дефицит чистой воды. Одна из проблем заключается в том, что процесс обессоливания является энергетически емким, например, при использовании технологии обратного осмоса требуется до 6 кВт-ч электроэнергии для опреснения 1 м³ морской воды (в зависимости от ее солености) [1].

Концепция использования ядерной энергии для обессоливания воды считается экономически целесообразной на протяжении почти 50 лет, но пока широко не применялась. Тем не менее, к настоящему времени накоплен достаточный опыт (~ 200 реакторо-лет) применительно к опреснению морской воды в различных странах: Японии, США, Индии и Казахстане (см. табл. 1) [2].

При обратном осмосе работают полупроницаемые мембраны, пропускающие под давлением воду и задерживающие молекулы примесей. При выборе выпарной технологии (multiple effect distillation – MED) морская вода нагревается в первой колонне, а образовавшийся пар идет на нагрев в последующих колоннах. При использовании метода мгновенного вскипания (Multi-Stage Flash Distillation - MSF) морскую воду испаряют по порядку через несколько камер, где постепенно снижается давление. Связи АЭС с обессоливающими установками двух первых типов [2] показаны на рис. 1.

Таблица 1. АЭС, на базе которых созданы установки по опреснению морской воды [2]

Название АЭС	Расположение	Электрическая мощность, МВт	Производительность обессоливания, м ³ /сут	Тип реактора/обессоливающей установки
Шевченко*	Актау, Казахстан	150	80 000 – 145 000	БН-350/ многоступенчатые дистилляционные опреснительные установки (ДОУ) двух типов: выпарные (MED) и мгновенного вскипания (MSF)
Ikata-1,2	Ehime, Япония	56	2000	PWR/ многоступенчатые ДОУ мгновенного вскипания (MSF)
Ikata-3	Ehime, Япония	890	2000	PWR/ установка обратного осмоса
Oh-1,2	Fukui, Япония	2x1175	3900	PWR/ многоступенчатые ДОУ мгновенного вскипания (MSF)
Oh-3,4	Fukui, Япония	2x1180	2600	PWR/ установка обратного осмоса
Genkai-4	Fukuoka, Япония	1180	1000	PWR/ обратно осмотическая установка
Genkai-3,4	Fukuoka, Япония	2x1180	1000	PWR/ многоступенчатые ДОУ выпарного типа (MED)
Takahama-3,4	Fukui, Япония	2x870	1000	PWR/ установка обратного осмоса
NDDP	Kalpakam, Индия	170	6300	PHWR/гибрид: установка обратного осмоса + многоступенчатая ДОУ мгновенного вскипания (MSF)
LTE	Trombay, Индия	40 (МВт, тепловых)	30	PHWR/низкотемпературное испарение (LTE)
Diablo Canyon	San Luis Obispo, США	2x1100	2180	PWR/ установка обратного осмоса

*АЭС Шевченко была остановлена в 1999 году после 26 лет эксплуатации

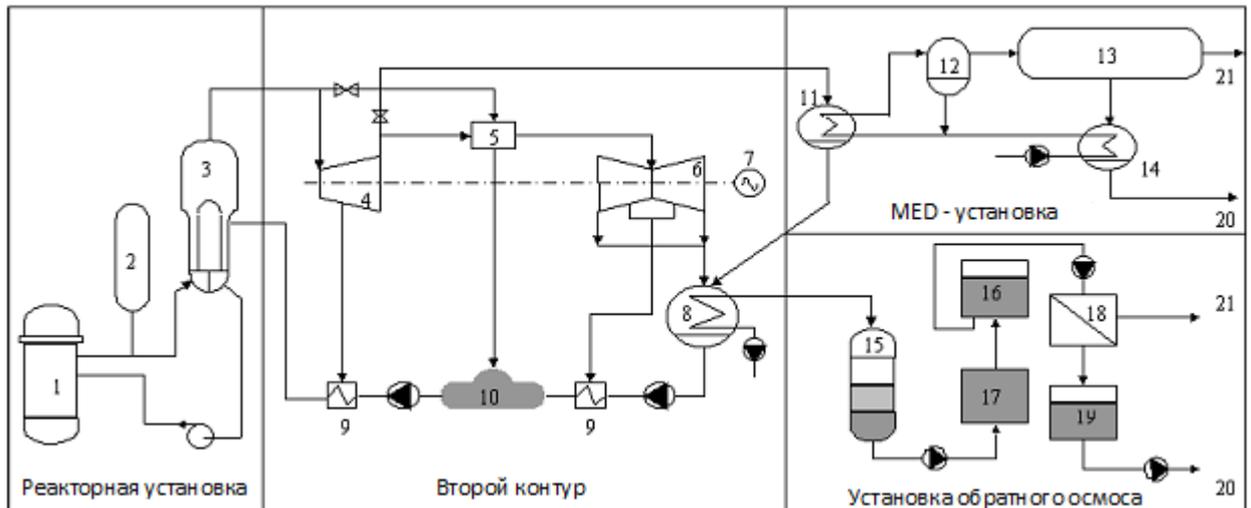


Рис. 1. Традиционная технологическая схема использования АЭС с реактором PWR для опреснения воды (с установками MED и обратного осмоса)

1: активная зона реактора, 2: компенсатор давления; 3: парогенератор; 4: цилиндр высокого давления турбины; 5: сепаратор-пароперегреватель; 6: цилиндр низкого давления турбины, 7: турбогенератор, 8: конденсатор турбины, 9: подогреватель, 10: деаэрактор; 11: подогреватель морской воды; 12: бак мгновенного вскипания, 13: опреснительная установка MED, 14: конденсатор MED, 15: предварительный фильтр, 16: бак хлорирования воды, 17: мембрана ультра-фильтрации, 18: мембрана обратного осмоса, 19: бак обессоленной воды, 20: выход чистой воды, 21: слив рассола

В настоящее время растущие потребности в питьевой воде и требуемая для ее производства электроэнергия стимулируют привлечение ядерных установок для решения этой проблемы. В декабре 2009 года южнокорейский консорциум во главе с КЕРСО выиграл тендер на строительство АЭС в ОАЭ [3]. Стоимость контракта составляет 20,4 млрд. долларов США, в соответствии с которым будет сооружено 4 энергоблока с реакторами APR-1400 со сроком службы 60 лет и электрической мощностью 1400 МВт каждый. Одной из причин атомного заказа был ежегодный 8% рост спроса на питьевую воду, который потребует дополнительно 60 ГВт электрической мощности в стране к 2015 году.

В 2010 году Саудовская Аравия официально объявила о начале мирной атомной программы, в соответствии с которой будет построена АЭС в Riyadh для удовлетворения растущих потребностей страны в электроэнергии и обессоленной воде [4].

Ряд стран также разрабатывает или рассматривает возможность использования АЭС для опреснения воды [1]. Китай исследует целесообразность сооружения ядерной опреснительной установки в регионе Yantai полуострова Shandong, производящей 160 000 м³/сут питьевой воды (MED), используя реактор NHR-200 тепловой мощностью 200 МВт. Южная Корея разработала проект модульного PWR SMART тепловой мощностью 330 МВт с перегрузкой топлива раз в три года. Энергоблок может генерировать 90 МВт (эл.) и

40 000 м³/сут. питьевой воды. Его сооружение планируется на острове Madura в Индонезии, используя технологию MSF. Аргентина также разработала проект небольшого реактора CAREM тепловой мощностью 100 МВт на базе модульного PWR для двухцелевого использования. Тунис исследует возможность строительства АЭС и сопряженной с ней опреснительной установки на юго-востоке страны для обессоливания слабосоленых грунтовых вод. Египет изучает целесообразность строительства аналогичной двухцелевой станции в El-Dabaа на средиземноморском побережье. Текущие планы предусматривают сооружение двух энергоблоков электрической мощностью 1000 МВт к 2017-18 гг. Катар рассматривает такую же возможность, так как потребности страны в пресной воде в 2010 году достигли 1,3 млн. м³ в сутки. Водный дефицит в Иордании составляет 1,4 млн. м³ в сутки, что вынуждает страну к активному поиску атомных источников энергии для компенсации имеющегося дефицита. Ливия в 2007 году подписала меморандум с французской компанией AREVA о строительстве АЭС средней мощности для опреснения морской воды. Пакистан разрабатывает демонстрационную опреснительную установку (MED), получающую энергию от реактора KANUPP типа PHWR электрической мощностью 125 МВт около Карачи, которая сможет производить пресную воду в объеме 1600 м³/сут. Марокко совместно с Китаем завершило предпроектные исследования для площадки Tap-Tap на атлантическом побережье, предполагая сооружение реактора тепловой мощностью 10 МВт, с помощью которого будет вырабатываться 8000 м³/сут пресной воды. Правительство планирует построить первую АЭС в 2016-17 году.

Конкурентоспособность ядерно-опреснительных установок определяется вопросами безопасности, экологическими и экономическими факторами.

Основное отличие схемы связи ядерного источника энергии с опреснительной установкой от аналогичной схемы для тепловой станции заключается в необходимости дополнительного промежуточного контура, который обычно состоит из петли с теплообменником и рециркуляционным насосом [2]. Существенным требованием к параметрам промежуточного контура является необходимость поддерживать в нем более высокое давление, чем в сопряженном контуре АЭС, для исключения гипотетических радиоактивных протечек из первого контура АЭС в опреснительную установку при двойном разрыве трубок в парогенераторе и промежуточном теплообменнике.

В принципе, опреснительная установка является одной из систем отвода тепла к конечному поглотителю. При ее отказе возникает переходный процесс с нарушением отвода тепла от реакторной установки, но авария такого типа обычно рассматривается в

рамках стандартных анализов по обоснованию безопасности. При использовании опреснительной установки на основе обратного осмоса ее отказ не влияет на отвод тепла, но вносит возмущение в работу системы электроснабжения. Однако такие переходные процессы также обычно представлены в анализах безопасности. Еще одной стандартной аварией, уже рассматриваемой в обоснованиях безопасности, является разрыв трубопровода, осуществляющего передачу тепла от АЭС к опреснительной установке.

Основной специфической проблемой опреснения воды на основе ядерной энергии является потенциальное радиоактивное загрязнение конечного продукта, в первую очередь, тритием. Важно отметить, что тритиевая вода в 25 000 раз более токсична для организма человека, чем газообразный тритий. Общепринятыми мерами для уменьшения содержания трития до стандартов питьевой воды являются:

- упоминавшее выше более высокое давление в промежуточном контуре по сравнению со смежным контуром АЭС;
- удаление неконденсируемых газов из первого и второго контуров АЭС;
- установка емкостей достаточно большого объема для накопления обессоленной воды с целью контроля ее свойств и организации необходимых корректирующих мер до направления потребителю;
- окончательная обработка воды с помощью химических и механических (фильтрация) процессов для окончательной доводки ее до стандартов питьевой воды.

Предельные требования к содержанию трития в питьевой воде приведены в таблице 2.

Применение атомной энергии для обессоливания воды решает часть экологических проблем, сопряженных с использованием органического топлива и возобновляемых источников энергии. В [2] сравнивается влияние различных источников на окружающую среду и делается вывод о хорошей перспективе использования ядерной энергии и ее недооцененности. В то время как влияние собственно процесса опреснения на морскую экологию практически не зависит от типа энергетической установки и определяется местными условиями, то сам ядерный источник энергии имеет очевидные преимущества в плане атмосферных загрязнений, воздействия на побережье, шумовых и визуальных воздействий по сравнению с имеющимися альтернативами.

Таблица 2 Требования к допустимому содержанию трития в питьевой воде

Страна	Предельно допустимое содержание трития, Бк/л
Австралия	76 103
Финляндия	30 000
Канада	7000
Европейский Союз	100*
США	740
ВОЗ	10 000
Казахстан	7700
Швейцария	10 000

* это, скорее, уровень тревожного оповещения, чем регулирующие требования

Прямое воздействие на атмосферу от опреснительной установки заключается в выбросах кислорода и азота, которые имеют незначительное экологическое значение. Основное неблагоприятное влияние на атмосферу связано с источником энергии, используемым для опреснения воды, а энергетические затраты на опреснение достаточно велики. Для их покрытия используются различные методы, в частности, сжигание органического топлива, что оказывает дополнительное негативное воздействие на окружающую среду. В настоящее время климатические изменения возобновляют интерес к использованию ядерной энергии для опреснения морской воды.

Здесь ядерная установка предлагает решение одной из главных проблем в опреснении воды, т.е. резкое снижение негативного влияния на атмосферу от источника энергии. Удельные выбросы (на единицу выработанной энергии), влияющие на парниковый эффект, намного ниже от атомной станции, чем от источников энергии на угле, нефти или природном газе, меньше, чем от солнечных батарей, и как минимум, не больше, чем от ветряных станций. Это наиболее привлекательная черта ядерного опреснения.

Одна из экологических проблем опреснения морской воды связана с высококонцентрированным рассолом, который образуется в процессе обессоливания и сливается в океан. Влияние рассола, образующегося в процессе опреснения воды, на морскую среду определяется повышением содержания солей в районе его возврата в

океан (поверхностным или придонным) и влиянием этого изменения на жизнедеятельность живых организмов. Другими важными факторами воздействия на экосистему является повышение температуры морской воды и ее pH, а также концентрации химических примесей в месте сброса от опреснительной установки.

Одним из путей снижения негативного экологического воздействия рассола является его коммерческое использование для извлечения полезных материалов или производства соли (так называемая, технология нулевого сброса жидкости – Zero Liquid Discharge). Концентрация солей в рассоле может быть также снижена за счет его смешивания со сбросной водой смежной АЭС. Следует заметить, что температурное воздействие собственно опреснительной установки заметно ниже, чем воздействие самой АЭС, используемой только для выработки электроэнергии, так как промежуточный контур является тепловым барьером.

С другой стороны, существует тенденция считать экологическое воздействие от объема и, соответственно, расхода забираемой морской воды более существенным для экологии фактором, чем возвращаемый от опреснительной установки рассол. Основное негативное воздействие оказывается на морскую фауну, обитающую в прибрежной полосе, которая или засасывается насосными установками, или гибнет от ударных воздействий на вращающихся фильтрующих сетках. Сравнение удельных объемов потребления воды на единицу выработанной электрической мощности различными источниками энергии приведено в таблице 3 [2].

Таблица 3 Удельное потребление морской воды различными источниками ее опреснения (м³/МВт·ч)

Источник	Прямоточное охлаждение	Пруд-охладитель/бассейн	Градирири
Ядерный	95-230	2-4	3-4
Органическое топливо	76-190	1-2	2
Природный газ/нефть	29-76	/	1

С точки зрения влияния на береговую зону обычно рассматриваются три фактора: сооружение установки, отчуждение земель и шумовые/визуальные воздействия. В плане сооружения ядерно-опреснительная установка имеет очевидные преимущества по сравнению с большинством альтернатив. Они заключаются и в меньшей площади

территории, отчуждаемой для строительных работ, и в меньших затратах материалов на единицу вырабатываемой мощности (см. таблицу 4) [2]1. К недостатку следует отнести заметно большее время сооружения объекта.

Таблица 4 Удельный расход материалов для станций различного типа

Метод	Расход стали (т/МВт)	Расход бетона (м ³ /МВт)
Ядерный (PWR выпуска 1970-х)	40	190
Ветряная (выпуска 1990-х)	460	870
Уголь	98	160
Комбинированный цикл на основе природного газа	3,3	27

Проблема отчуждения земель является благоприятным аспектом для ядерной энергетики в сравнении с другими конкурирующими технологиями (см. таблицу 5) [2].

Таблица 5 Удельный расход территории для станций различного типа

Метод	Площадь, необходимая для выработки 1 ГВт электроэнергии в соответствии с требованиями (км ²)	
	Мировой энергетический совет, МАГАТЭ	Энергетическая комиссия Калифорнии
Солнечная энергия	20-50	10-50
Ветер	50-150	22
Биомасса	4000-6000	/
Ядерная энергия	1-4	3
Сжигание газа	/	6,5
Геотермальная энергия	/	7

В плане шумовых/визуальных воздействий АЭС, как минимум, не проигрывают своим конкурентам.

Проект координированных исследований МАГАТЭ по оценке экономичности ядерных опреснительных установок показал их техническую реализуемость и

экономическую привлекательность для разных типов реактора и различных местных условий [5]. Стоимость ядерно-опреснительного варианта по сравнению с наиболее экономичным органическим топливом, т.е. газотурбинной установкой, может быть на 30-60% ниже в зависимости от цен на газ. Сделан прогноз, что ядерный вариант опреснения будет конкурентоспособным, если цены на газ превысят 150 долл. США за тонну нефтяного эквивалента (\$/toe) и учетная ставка будет ниже 10%. Для оценки стоимости различных вариантов опреснения воды МАГАТЭ разработало и продолжает совершенствовать программное средство DEEP (версия 3).

Стоимость ядерного обессоливания может быть снижена при утилизации отработанного тепла АЭС, например, циркуляционная вода, сбрасываемая после конденсаторов турбин, может использоваться для подогрева питательной воды в опреснительной установке, работающей по методу обратного осмоса, что позволяет снизить затраты на 7-15% по сравнению с традиционной схемой. Аналогичные системы предварительного нагрева значительно снижают затраты в опреснительных установках MED. Другим подходом к снижению цены отпускаемой пресной воды является использование гибридных схем. И, наконец, извлечение стратегических и ценных материалов из сливаемого рассола одновременно повышает экономические выгоды от процесса и снижает негативную нагрузку на окружающую среду.

Затраты на ядерно-опреснительные установки сильно зависят от таких факторов, как учетная и процентная ставки, коэффициент готовности АЭС, стоимость электроэнергии, стоимость обессоливающей установки для конкретных местных условий и т.п. В целом, можно утверждать, что стоимость ядерного опреснения по методу обратного осмоса будет в диапазоне 0,5-0,9 долларов США за кубометр воды, а использования термальных систем, например, MED, немного поднимает ценовую планку до уровня 0,6-0,96 США за кубометр воды. С другой стороны, последние обеспечивают более низкую соленость отпускаемой воды (около 30 промилле) по сравнению с обратным осмосом (300-500 промилле). Выбор метода ядерного опреснения является комплексной задачей с учетом специфических промышленных, сельскохозяйственных и питьевых потребностей страны в воде. На ценообразование также влияет стоимость транспортировки воды от установки к потребителям, которая составляет 0,1-0,2 цента/м³/км [5].

Следует отметить, что при сооружении обессоливающей установки на базе новой АЭС возникают дополнительные финансовые риски, связанные с повышением требований к безопасности ядерных объектов, значительными капитальными затратами, длительным

периодом строительства, большой степенью неопределенности в отношении графика сооружения и финансирования, которые достаточны для возникновения общественной оппозиции. Если правительство или эксплуатирующая организация не поддерживает такой проект, то эти причины могут привести инвесторов к отказу от участия в нем [2].

Список литературы

- 1 World Nuclear Association. Nuclear Desalination. Февраль 2010 г. Адрес в интернете: <http://www.world-nuclear.org/info/inf71.html>
2. International Atomic Energy Agency. Environmental Impact Assessment of Nuclear Desalination. IAEA-TECDOC-1642, Vienna, март 2010 г.
3. World Nuclear Association. Nuclear Power in the United Arab Emirates. Апрель 2010 г. Адрес в интернете: http://www.world-nuclear.org/info/UAE_nuclear_power_inf123.html
4. U.S. – Saudi Arabian Business Council. Saudi Arabia to Create First Nuclear City in Kingdom. Апрель 2010 г. Адрес в интернете: <http://www.us-sabc.org/custom/news/details.cfm?id=640>
5. International Atomic Energy Agency. Economics of Nuclear Desalination: New Developments and Site Specific Studies. IAEA-TECDOC-1561 Vienna, июль 2007 г.