

## Диверсификация рынка топлива реакторов ВВЭР

Обеспечение электроэнергией ряда стран Восточной Европы во многом зависит от функционирования их атомного флота, который полностью состоит из реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 российского производства. После политических конфликтов в Украине, в том числе присоединения Россией Крыма, правительства этих стран все более обеспокоены безопасными поставками топлива для реакторов ВВЭР.

В настоящее время только компания Вестингауз Электрик может стать альтернативным поставщиком топлива для ВВЭР, и она недавно подписала расширенный контракт на поставку топлива для 13 блоков ВВЭР-1000 в Украину.

Компания Westinghouse также готова поставлять топливо для реакторов ВВЭР-440, которыми оснащены АЭС стран Европейского Союза (ЕС). В мае 2015 г. компания Вестингауз вместе с девятью партнерами в различных странах начали разработку программы, которая позволит осуществить важные шаги в направлении диверсификации рынка топлива ВВЭР-440. Программа финансируется Европейским сообществом по атомной энергии (Евратом).

В странах ЕС и на Украине действует 33 блока с реакторами ВВЭР-440 или ВВЭР-1000 (см. таблицу). Оба типа используют ТВС, имеющие гексагональную форму, но конструкция ТВС в реакторах ВВЭР-440 значительно меньше и активная зона содержит гораздо меньше топливных стержней. Кроме того, в то время как в реакторе ВВЭР-1000 для контроля реактивности используются сборки кластера регулирующих стержней, в активной зоне реактора ВВЭР-440 это достигается путем вставки или удаления контрольных ТВС в активной зоне.

**Таблица. Реакторы ВВЭР в странах Восточной Европы и в Украине**

Страна	Название АЭС и энергоблока	Тип реактора
Болгария	Козлодуй 5-6	ВВЭР-1000
Чехия	Дукованы 1-4	ВВЭР-440
	Темелин 1-2	ВВЭР-1000
Финляндия	Ловииса 1-2	ВВЭР-440
Венгрия	Пакш 1-4	ВВЭР-440
Словакия	Богунице 3-4	ВВЭР-440
	Моховце 1-2	ВВЭР-440
Украина	Хмельницкая 1-2	ВВЭР-1000
	Ровенская 1-2	ВВЭР-440
	Ровенская 3-4	ВВЭР-1000
	Южно-Украинская 1-3	ВВЭР-1000
	Запорожская 1-6	ВВЭР-1000

### Экспериментальные сборки для украинских АЭС

Все АЭС в Украине эксплуатируются ГП "Национальная атомная энергогенерирующая компания "Энергоатом" (НАЭК "Энергоатом") со штаб-квартирой в Киеве.

Разработку топлива для реакторов ВВЭР-1000 для поставки в Украину компания Вестингауз начала в 2001 г. после подписания правительственного соглашения между Украиной и США о сотрудничестве в энергетической сфере и безопасности.

Работа выполнялась в рамках программы квалификации ядерного топлива для Украины (UNFQP).

Ранее компания Вестингауз разработала и поставила топливо для чешской АЭС "Темелин" с реакторами ВВЭР. После завершения проекта разработки топлива для ВВЭР-1000, который был активно поддержан Северо-западной национальной лабораторией США, на заводе Вестингауз в г. Колумбия, шт. Южная Каролина, были изготовлены шесть экспериментальных сборок (LTAs). В 2005 г. они были загружены в реактор третьего энергоблока Южно-Украинской АЭС.

### Первые поставки на Украину

Перед тем, как развернуть программу LTA по поставке топлива в объемах, необходимых для перегрузки реактора, компания Вестингауз попыталась усилить жесткость несущей конструкции кассет LTA, добавив утолщение на каждой решетке (см. рис. 1). Конструкция WFA (тепловыделяющая сборка Вестингауз) также претерпела изменения, которые коснулись материала 13 из 16 решеток для уменьшения паразитного поглощения нейтронов и снижения тем самым стоимости топливного цикла.

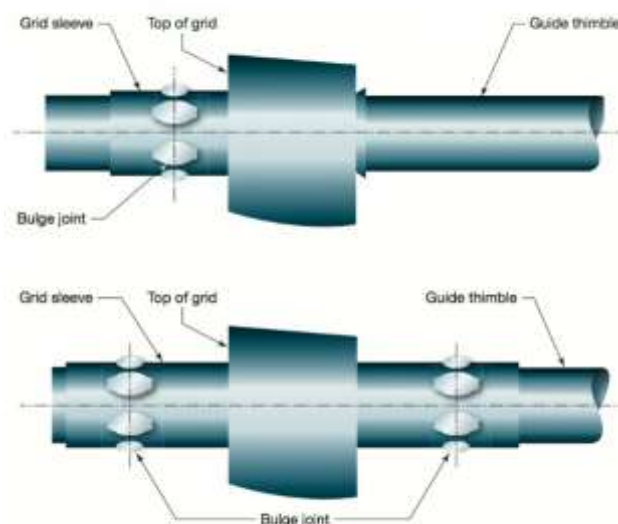


Рис. 1. Компания Вестингауз для усиления структурной жесткости добавила утолщение на каждой решетке (внизу)

Чтобы обеспечить поставку необходимого количества ТВС для перегрузки реакторов, производство переместили на завод Вестингауз в Вестеросе (Швеция). В 2009 г. Вестингауз изготовил там 42 ТВС, которые в начале 2010 г. были использованы для загрузки третьего энергоблока Южно-Украинской АЭС. Как было сказано выше, это было проведено в рамках проекта UNFQP. В следующем, 2011 г., вновь была проведена полная загрузка (42 WFA) третьего энергоблока Южно-Украинской АЭС. Кроме того, такое же количество свежих ТВС было загружено во второй энергоблок той же АЭС.

Кроме поставок ядерного топлива, Вестингауз получил от НАЭК "Энергоатом" разрешение на поставку системы дистанционного контроля активной зоны Veason®, которая действует на АЭС "Темелин". Данная система использовалась на третьем энергоблоке Южно-Украинской АЭС для точного моделирования

смешанных условий активной зоны и повышения уровня поддержки оператора ядерного реактора при переходных режимах.

## Проблемы при перегрузке

В 2012 г. на нескольких WFA, установленных на двух энергоблоках Южно-Украинской АЭС, были зафиксированы царапины и неровности, даже повреждения решеток при перестановке кассет. Повреждения решеток были вызваны механическим воздействием референтного топлива, а также высокими поперечными нагрузками, превышающими установленные пределы прочности.

В отличие от конфигурации топлива для других водо-водяных реакторов, где используется квадратная решетка, шестиугольная решетка активной зоны ВВЭР-1000 чаще вступает в контакт с тепловыделяющими сборками, особенно в тех случаях, если соседние сборки оказываются перекошенными (см. рис. 2). В рассматриваемом случае тепловыделяющие сборки Вестингауз соседствовали с конкурирующими сборками, отличавшимися значительным искривлением и большой жесткостью конструкции. Тепловыделяющая сборка, устанавливаемая на место (извлекаемая) в таких условиях, может привести к механическому воздействию с большим риском повреждения решетки. Однако следует отметить, что целостность топливных стержней ни разу не была нарушена.

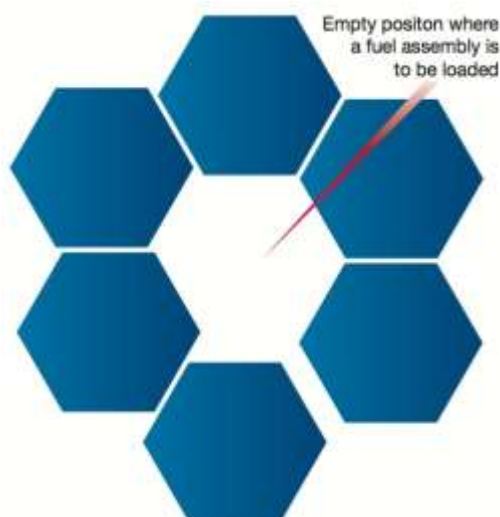


Рис. 2. Деформированная ТВС представляет собой проблему при загрузке, поскольку геометрия пустого пространства, куда ТВС должна быть загружена, более не является шестиугольной

Как следствие, некоторые сборки с потенциальным повреждением были помещены в бассейн выдержки. Проведенное обследование привело к выводу, что большую часть сборок можно использовать и только некоторые подлежат ремонту. Тем не менее, Госатомнадзор Украины запретил загрузку свежих тепловыделяющих сборок Вестингауз данной конструкции.

Для решения данной проблемы Вестингауз приступил к осуществлению двух программ, касающихся оптимизации загрузки активной зоны и модификации конструкции ТВС для снижения риска повреждения топлива при механическом воздействии.

## Оптимизация загрузки

Вестингауз разработал новую последовательность загрузки активной зоны, основанную на имеющемся опыте, с использованием некоторых фундаментальных принципов.

С учетом риска воздействия был составлен рейтинг различных сценариев загрузки соседних ТВС, который впоследствии был использован для оптимизации загрузки. Вестингауз также применил загрузку, начинающуюся от центра активной зоны, и стабилизировал загрузку с помощью моста в форме треноги от центра до кожуха АЗ. Были также разработаны модельные устройства с гладкой поверхностью и направляющие для верхней загрузки, облегчающие загрузку ТВС в установленные участки активной зоны.

Принятые меры оказались очень эффективными. Со времени отключений 2012 г., поперечные нагрузки при перегрузке активной зоны были уменьшены, и не было зафиксировано ни единого случая повреждения решеток ТВС. Кроме того, проведенная оптимизация помогла значительно сократить время загрузки.

### **Усовершенствование конструкции топлива**

В конструкцию WFA были внесены изменения, позволяющие увеличить боковую прочность решетки и минимизировать риск механического контакта тепловыделяющих сборок.

Толщина наружной скобы дистанционирующих решеток увеличилась, и она стала изготавливаться исключительно из сплава 718. Были добавлены внутренние обхваты (крепления), и профиль был модифицирован для снижения риска контакта с соседним резидентным топливом. Для облегчения загрузки ТВС в нижней части появились скругления, а в верхней – боковые пластины.

Усовершенствованная конструкция, получившая название RWFA (твердая тепловыделяющая сборка Вестингауз) прошла всесторонние механические, термические и гидравлические испытания. Первая партия топлива данной конструкции была загружена в третий энергоблок Южно-Украинской АЭС в марте 2015 г. Это была первая загрузка свежего топлива Вестингауз после отключений 2012 г. Загрузка новых тепловыделяющих сборок прошла без малейших повреждений. Уже загруженные в активную зону 66 WFA продолжали работать в штатном режиме.

### **Послереакторное обследование**

Перегруженные WFA для второго и третьего энергоблоков Южно-Украинской АЭС были тщательно обследованы. 26 сборок завершили четыре запланированных цикла по программе UNFQP, в то время как 36 WFA продолжают свой завершающий, четвертый цикл на третьем энергоблоке. Тепловыделяющие сборки проходили послереакторное обследование по окончании каждого цикла. Результаты соотносятся с базой данных Вестингауз для работоспособного топлива и с ожиданиями экспертов.

Краткое изложение результатов:

- измерения зазора между стержнем и головкой ТВС показали значительный запас, подтверждающий увеличение топливного стержня, что находится в полном соответствии базой данных ZIRLO®;
- все данные по запиранию канала (прогибу топливного стержня) оказались ниже установленного предела;
- измерения осевого увеличения ТВС принесли ожидаемые результаты;
- сила сопротивления RCCA (стержневая сборка СУЗ) не превысила установленных пределов и соответствовала базе данных Вестингауз для направляющих колец ZIRLO;
- измерения прогиба и скручивания ТВС не вышли за пределы практики для ТВС с направляющими кольцами ZIRLO;
- увеличение решетки соответствует базе данных для циркониевых решеток;
- толщина оксидного слоя периферийных топливных стержней значительно ниже допустимых пределов.

Основываясь на характеристиках топлива Вестингауз и принимая во внимание способность Компании эффективно решать проблемы, подобные проблемам, связанным с перегрузкой активной зоны (в 2012 г.), руководство НАЭК "Энергоатом" продлило в конце 2014 г. контракт с Вестингауз. Новый контракт включает поставки ядерного топлива не только для Южно-Украинской, но и для Запорожской АЭС.

### **Разработка топлива для ВВЭР-440**

Вместе с Украиной, страны ЕС, использующие реакторы ВВЭР-440, проявляют растущий интерес к квалификации второго поставщика.

Еще в 1998 г. BNFL (British Fuel Nuclear Limited) поставила экспериментальные сборки на второй энергоблок АЭС "Ловииса" (Финляндия). Сборки были изготовлены на заводе Спрингфилдс (Великобритания), чтобы квалифицировать второго поставщика для АЭС "Ловииса", а также для АЭС "Пакш" (Венгрия).

После успешного завершения работы экспериментальныхборок, в декабре 1999 г. BNFL получила контракт на поставку топлива для АЭС "Ловииса". В период между 2001 и 2007 гг. было поставлено семь партий топлива для перегрузки. Незадолго до подписания данного контракта завод Спрингфилдс был включен в состав Вестингауз после слияния BNFL и Вестингауз. Руководство Вестингауз приняло решение о переносе производства топлива для перегрузки с завода Спрингфилдс на завод ENUSA (Испания).

После двух неудачных топливных тендеров (в 2006 и в 2007 гг.) Вестингауз решил отказаться от работы с реакторами ВВЭР-440. Позже возросшее значение диверсификации топливных поставок привело к обсуждению (с участием различных ядерных предприятий) возможного возвращения компании Вестингауз на рынок с топливом улучшенной конструкции, включая усовершенствованные материалы и улучшенные механические свойства.

### **Программа Евратома**

Евратом выделил средства для поддержки диверсификации поставок ядерного топлива для ВВЭР, действующих в ЕС. В 2015 г., консорциум, состоящий из

компания Вестингауз и восьми европейских партнеров, получил контракт от Евратома на более чем 2 млн. евро на программу квалификации второго поставщика.

Программа будет сосредоточена на разработке технологий и методик, необходимых для лицензирования конструкции топлива для реакторов ВВЭР-440. В консорциум входят компании ЕС, обладающие различным опытом и знаниями в различных областях науки и техники, эксплуатирующие реакторы ВВЭР-440. Консорциум компаний и научных центров представлен ниже:

- VUJE (Словакия)
- ÚJV Rež (Чехия)
- Технологический университет Лаппеэнранта (Финляндия)
- Национальная ядерная лаборатория (Великобритания)
- NucleoCon (Словакия)
- Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт" (Украина)
- Институт трансурановых элементов Объединенного научно-исследовательского центра Еврокомиссии (ЕС)
- Enusa Industrias Avanzadas (Испания)

В российском внешнеполитическом ведомстве сотрудничество между НАЭК "Энергоатом" и Вестингауз назвали "опасным экспериментом, затеянным Киевом", который ставит под угрозу "безопасность и здоровье украинских граждан и народов Европы". Стремление Киева уйти от зависимости от российского производителя может привести к серьезным последствиям, подчеркнули в ведомстве. МИД РФ напомнил, что "тепловыделяющие сборки, производимые компанией Вестингауз, неоднократно демонстрировали несоответствие требованиям к качеству топлива для реактора ВВЭР-1000. Так, попытки его использования на чешской АЭС "Темелин" привели к достаточно серьезному инциденту. Загрузка этого топлива в АЭС Украины также повлекла череду происшествий".

**ИСТОЧНИКИ:**

1. <http://www.neimagazine.com/features/4682502/>
2. <http://www.westinghousenuclear.com/About/News/>
3. <http://regnum.ru/news/economy/1957338.html>

Подготовил А. Саликов