

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации промышленных реакторов (НП-007-98) – М.: Госатомнадзор, 1999. – 120 с.
2. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива: Справочник / В.М. Колобашкин, П.М. Рубцов, П.А. Ружанский, В.Д. Сидоренко – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 382 с.
3. Буланенко В.И., Фролов В.В. Радиационные характеристики остатков топлива в кладках снятых с эксплуатации ПУТР // Атомная энергия. – 1995. – Т. 78. – Вып. 6. – С. 396–400.
4. Бушуев А.В. и др. Определение радиоактивной загрязненности графита реакторов предприятия СХК. Научно-технический отчет Международного научно-технического центра, ISTC 561, 2000. – 147 с.

УДК 621.039.519

ПРОБЛЕМА ИСКРИВЛЕНИЯ КОЛОНН ГРАФИТОВЫХ КЛАДОК УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ АДЭ-4 И АДЭ-5 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗА ПРЕДЕЛОМ ПРОЕКТНОГО СРОКА СЛУЖБЫ

В.Н. Мещеряков, П.М. Гаврилов, А.А. Цыганов, А.Г. Кохомский, В.Б. Чуканов,
М.В. Антоненко, И.В. Шаманин*, В.Н. Нестеров*

ФГУП "Сибирский химический комбинат", г. Северск

*Томский политехнический университет

E-mail: nesterov@phtd.tpu.edu.ru

Проведен анализ экспериментальных данных по динамике искривления технологических каналов в объеме графитовых кладок промышленных уран-графитовых реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 Сибирского химического комбината. Приведен обзор технических решений, позволивших обеспечить стабильную эксплуатацию кладок в течение 20 лет после окончания их проектного ресурса. Использована методика расчетного анализа устойчивости колонн и усовершенствована дискретная модель кладки, что позволяет проводить сравнительный анализ факторов, влияющих на устойчивость колонн. Результатом работы явилось снижение искривления кладок до приемлемого состояния при использовании минимально-необходимого количества каналов-натяжителей.

Проблема формоизменения графитовых кладок оказала существенное влияние на эксплуатацию ядерных реакторов канального типа с графитовым замедлителем. В каждом случае эти проблемы имеют свои специфические особенности, определяемые конструкцией активной зоны, технологией её эксплуатации и режимом облучения графита [1].

Графитовые кладки реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 идентичны по конструкции. Они состоят из вертикальных колонн, образованных установленными друг на друга монолитными графитовыми блоками. Для придания кладке жесткости в поперечном направлении, верхние и нижние графитовые блоки соседних колонн имеют разную высоту. В блоках имеются сквозные вертикальные цилиндрические отверстия, образующие в каждой колонне тракт, через который проходит технологический канал с твэлами. Между технологическим каналом и внутренней стенкой отверстия в графитовой колонне размещены комплекты графитовых втулок, предназначенных для снижения радиационного воздействия на кладку, упрощения процедуры извлечения технологических каналов при возникновении нештатных ситуаций и для создания оптимальных условий продувки через кладку инертного газа (азота) во время работы реактора на мощности. Для придания монолитности кладки, её наружная боковая поверхность облицована вставками из алюминиевого сплава и стянута стальными лентами-бандажами, снабженными пружинными амортизаторами, которые компенсируют тепловое расширение кладки.

В процессе эксплуатации кладок приходится принимать меры по сохранению прямолинейности участков технологических каналов, расположенных в пределах графитовой кладки. Это необходимо для обеспечения свободного перемещения в ячейках стержней управления и аварийной защиты, обеспечения беспрепятственного извлечения и установки в реактор сменяемых деталей (технологических каналов, графитовых втулок). Кроме того, искривление колонн кладки обуславливает повышенное силовое воздействие на бандажи, стягивающие кладку по азимуту, что может вызвать их деформацию, и даже разрыв. Таким образом, задачи контроля за искривлением кладки, исследования факторов, вносящих определяющий вклад в этот процесс, и разработка мер по стабилизации искривления сохраняет актуальность на протяжении большей части жизненного цикла реакторов. В настоящей работе поставлена цель: определить наиболее эффективные методы и технические мероприятия для изучения степени искривления графитовых колонн, реализовать их и провести обоснование возможности дальнейшей эксплуатации кладки реакторов.

Исходной причиной искривления графитовых колонн обычно является радиационно-термическое формоизменение графитовых блоков. Поскольку особенности формоизменения существенно зависят от режима облучения графита [2], то, соответственно, в разных реакторах, отличающихся условиями эксплуатации, влияние формоизменения графитовых конструктивных элементов на

искривления колонн кладок различно. Так, реакторы ПО «Маяк» в первые годы после пуска работали на низком уровне мощности, при этом температура кладки была такова, что большая часть графитовых блоков испытывала низкотемпературное распухание [3], вследствие чего имело место «двугорбая» форма искривления графитовых колонн с максимальным прогибом в верхней и нижней части кладки (рис. 1). Кладки реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 с момента пуска работали в условиях, когда низкотемпературное распухание графита отсутствует. Радиационные факторы и в этом случае оказывают некоторое влияние на искривление кладки через деформацию (неравномерную усадку) графитовых блоков из-за асимметричного расположения отверстия, градиентов нейтронного потока вблизи источников неоднородности, таких как ячейки системы управления и защиты (СУЗ) или ячейки с нестандартной загрузкой топлива. Однако, искривление большинства колонн больше «естественного» искривления, обусловленного радиационным воздействием. Типичная форма искривления оси колонны, характерная для реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5, близка к симметричной относительно центра по высоте. Более интенсивному искривлению осей колонн изначально способствовало попадание графитовой крошки в промежуток между торцами смежных графитовых блоков. В процессе расчистки ячеек происходило также попадание более крупных фрагментов графитовых втулок и блоков между соседними колоннами. Наибольший вклад в искривление колонн в начальный период эксплуатации кладок внесли профилактические работы с использованием графитовой пасты, которая запрессовывалась в ячейки для сохранения целостности колонн.

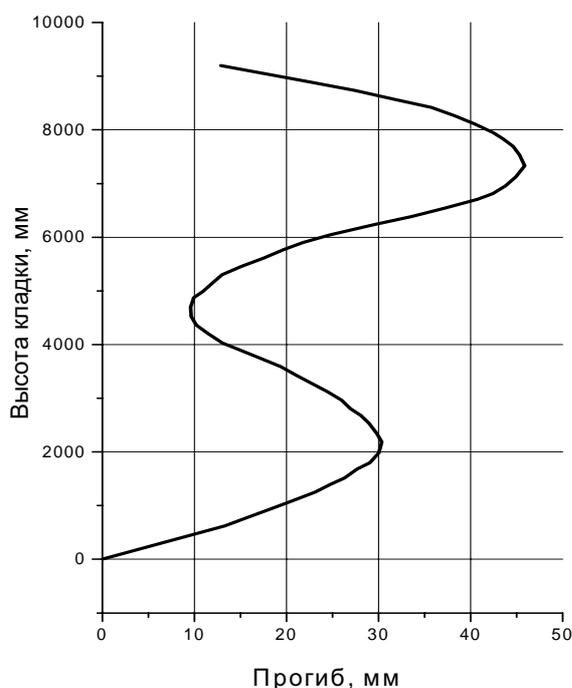


Рис. 1. Низкотемпературное распухание реакторного графита [3]

Несмотря на образование локальных районов с увеличенным искривлением колонн (криворазделов) вблизи ячеек, отремонтированных графитовой пастой, в течение длительного времени динамика искривления кладки в целом была достаточно стабильной. Усреднённое по модулю значение средней стрелы прогиба колонн увеличивалось с постоянной скоростью. Незначительное искривление колонн не создавало препятствий к нормальной эксплуатации кладки, выполнению регламентных технологических операций по калибровке ячеек, плановой замене отработавших технологических каналов и комплектов графитовых втулок. Постепенно, по мере нарастания искривления колонн, графитовая кладка оказалась в таком состоянии, что совокупность сил, сдерживающих искривление колонн, оказалась недостаточной для того, чтобы противостоять воздействию искривляющих усилий. Плавный процесс роста прогибов колонн сменился резким искривлением кладки, связанным с потерей стабильности формы кладки в плоскости перекрёстных рядов. Потеря формы колонн привела к тому, что в перекрёстных рядах кладки оказались выбранными зазоры между соседними графитовыми колоннами, обусловленные проектными размерами блоков и поперечной усадкой блоков. Ближайшие к криворазделам колонны приобрели максимальное искривление, по мере удаления от криворазделов стрела прогиба колонн уменьшалась, однако во многих перекрёстных рядах суммарный баланс сдерживающих и спрямляющих сил оказался отрицательным. От дальнейшего искривления кладка удерживалась в основном за счёт сил, обеспечиваемых стальными бандажами, стягивающими её по азимуту.

Для стабилизации кладок в первую очередь были предприняты меры, направленные на снижение искривляющих воздействий, обусловленных повышенным трением технологических каналов в тракте и осевыми нагрузками на отдельные колонны кладки со стороны силуминового настила. Разработаны и реализованы мероприятия по снижению сил трения между элементами, взаимодействующими с кладкой (в ячейки с большим прогибом колонн установлены втулки, прослабленные по наружному диаметру, увеличен зазор между втулками и технологическим каналом, вдвое уменьшена длина графитовых втулок, изменена конструкция переходного узла между кладкой и нижней частью тракта технологического канала). Как и на других реакторах аналогичной конструкции для полного закрепления колонн этих мер оказалось недостаточно. Было необходимо обеспечить источник дополнительного спрямляющего воздействия путём установки специальных технологических каналов-натяжителей.

Конструктивно канал-натяжитель отличается от обычных технологических каналов наличием дополнительных элементов, обеспечивающих принудительное растяжение канала, которое с избытком компенсирует силы трения в тракте в процессе температурного удлинения при разогреве канала в переходных режимах. В ячейках с искривлёнными графито-

выми колоннами натянутые технологические каналы создают поперечную спрямляющую нагрузку. Для реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 была предложена конструкция канала-натяжителя из того же алюминиевого сплава, что и обычные технологические каналы.

Одним из преимуществ таких каналов является их относительно невысокая стоимость. Однако возможность массового использования этих каналов ограничена из-за дополнительной нагрузки на верхнюю несущую металлоконструкцию реактора.

Ко времени, когда проблема искривления колонн графитовых кладок стала актуальной для реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5, уже разрабатывались подходы к созданию математических моделей поведения кладок с искривлёнными колоннами в переходных режимах работы реактора, характеризующихся наибольшей интенсивностью дестабилизирующих факторов. Были созданы специальные стенды-имитаторы, в том числе и полномасштабные, на которых экспериментальным путём определены некоторые количественные характеристики этих факторов. Однако в области расчетно-теоретического осмысления термомеханики кладок, многие вопросы пока решены не были: отсутствовала апробированная методика, позволяющая наилучшим образом разместить каналы-натяжители по ячейкам аппарата, не было определено оптимальное соотношение между силой натяжения, толщиной стенки этих каналов и их количеством, необходимым для удержания кладок. Кроме того, в связи с тем, что использование каналов-натяжителей ухудшает некоторые технико-экономические показатели реакторов, велись работы по дальнейшему совершенствованию конструкции натяжных устройств и по поиску альтернативных, либо дополнительных средств удержания стабильной формы кладок. Для выбора наиболее эффективных технических решений перечисленных задач требовалось существенно усовершенствовать имеющиеся расчетные методы анализа термомеханического взаимодействия элементов графитовой кладки. Также необходимо было обеспечить возможность численного моделирования влияния различных факторов на устойчивость графитовых колонн вместо сложных и дорогостоящих экспериментов по измерению деформации колонны при различных внешних воздействиях. Такие эксперименты выполнялись на полномасштабных стендах-имитаторах.

На СХК разработаны и использованы методика расчетного анализа устойчивости колонн, основанная на энергетическом методе, а также усовершенствованная дискретная модель кладки. Эти модели позволяют проводить сравнительный анализ различных факторов, влияющих на устойчивость колонн, используя экспериментальные результаты, получаемые на локальных стендах, имитирующих взаимодействие отдельных конструктивных элементов, размещённых в графитовой кладке, и сопрягаемых с ними технологических каналов. Модели колонны позволяют учесть влияние следующих факторов:

- силы трения, препятствующие температурному удлинению технологического канала (между трубой канала и опорными блоками, графитовыми втулками, деталями тракта канала, расположенными ниже графитовой кладки);
- гидродинамической составляющей, обусловленной давлением и скоростным напором теплоносителя в технологическом канале;
- поперечной нагрузки со стороны столба твэлов в искривлённом канале, обусловленной весом твэлов и перепадом давления теплоносителя;
- состояния торцевых поверхностей графитовых блоков, влияющие на расположение места контакта смежных блоков колонны;
- вертикальной нагрузки на колонну со стороны расположенных сверху конструктивных элементов;
- собственной жёсткости графитовых втулок и технологического канала.



Рис. 2. Расчетная зависимость поперечной уравнивающей силы от длины стрелы прогиба колонны

На рис. 2 приведены результаты расчётов, позволяющих оценить баланс сдерживающих и спрямляющих сил в неперевязанных рядах графитовой кладки с учётом наличия в части ячеек технологических каналов-натяжителей. На оси ординат отложены значения сосредоточенной поперечной силы, которую следует приложить к колонне с заданной стрелой прогиба для уравнивания прочих силовых воздействий в наиболее неблагоприятный в отношении искривления момент разогрева активной зоны. Как следует из расчётов, колонна кладки, достигшая искривления со стрелой прогиба ~50 мм неустойчива, и для удержания её от дальнейшего искривления необходимо прикладывать внешнюю спрямляющую нагрузку. Этот результат справедлив при достаточно благоприятных с точки зрения устойчивости колонны условиях. В частности предполагалось, что форма торцевых поверхностей графитовых блоков близка к идеально плоской, отсутствует графитовая крошка между элементами кладки и т.п. Из наблюдений за динамикой изменения прогибов ячеек реакторов АДЭ-4, АДЭ-5 следует, что резкое увеличение искривления

в отсутствие натяжителей, наступает после достижения колоннами стрелы прогиба в 40 мм. Таким образом, не имея надёжных данных о фактической геометрии блоков колонн в реакторе и о других подобных этому параметров, опираясь только на разработанные расчётные методики, можно выполнить только предварительные оценки по выбору оптимальной схемы размещения каналов-натяжителей и реализации других мер по уменьшению искривления. Необходимым элементом стратегии обеспечения стабилизации формы графитовых кладок должны быть эксперименты, направленные на определение неизвестных параметров расчётных моделей непосредственно в реакторе.

На первом этапе работ по размещению в реакторах каналов-натяжителей, важная экспериментальная информация была получена в результате анализа поведения неперевязанных рядов кладки после установки в отдельные ячейки этих рядов специальных спрямляющих штанг, натянутых с помощью пружин с усилием в диапазоне от 1,2 до 1,5 т. Конструкция этих штанг позволяла по степени сжатия пружин определять силу натяжения. Из наблюдений за динамикой искривления колонн в соседних ячейках оценивалась эффективность спрямления рядов кладки. Анализ полученных данных с использованием расчётных моделей позволил снизить неопределённость в информации, необходимой для выбора схемы закрепления кладок.

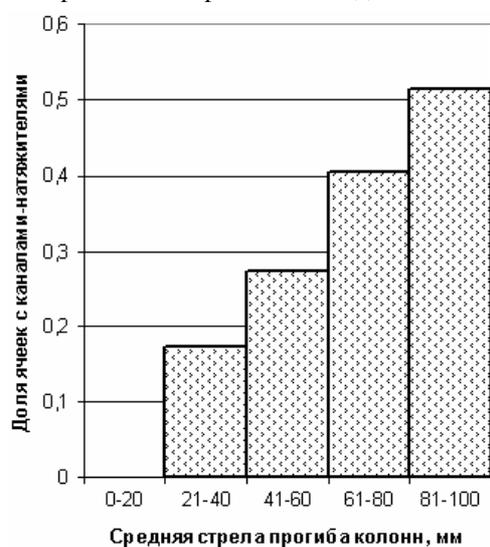


Рис. 3. Средняя плотность размещения каналов-натяжителей в неперевязанных рядах реактора АДЭ-4

В дальнейшем, по мере установки каналов-натяжителей и отслеживания их влияния на динамику искривления графитовых колонн в неперевязанных

рядах кладки эта неопределённость была сведена к минимуму. Выбранная стратегия оказалась весьма удачной. Её результатом явилось снижение искривления колонн до приемлемого состояния при использовании минимально-необходимого количества каналов-натяжителей. Диаграмма на рис. 3 количественно характеризует сформированную к настоящему времени, близкую к оптимальной, схему размещения натяжителей в реакторе АДЭ-4.

В результате реализации комплекса мер по стабилизации кладок скорость ее искривления, характеризующая изменением среднего по модулю значения стрелы прогиба всех колонн, снизилась до уровня, типичного для начального периода эксплуатации реакторов. Современное состояние кладок реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 характеризуется некоторым изменением характера искривления. Его причиной является начавшийся в конце 90-х годов прошлого века процесс образования продольных трещин в графитовых блоках, вызванный вторичным распуханием внутренних, наиболее облученных слоёв центральных графитовых блоков. Раскрытие продольных трещин влечёт увеличение наружных размеров блоков в поперечном сечении. В результате зазоры между соседними колоннами постепенно исчезают. Происходит расширение кладки. В отличие от искривления в предшествующие годы, которое происходило преимущественно в направлении неперевязанных рядов, сейчас наблюдается искривление и в перпендикулярной плоскости. При этом наиболее интенсивно искривляются колонны в периферийных ячейках, тогда как в центральной части искривление замедлилось, а в отдельных районах, где ещё остаются свободные зазоры между колоннами, имеет место даже некоторое спрямление кладки. Наблюдаемый процесс носит необратимый характер, замедлить его можно лишь уменьшив воздействие на реакторный графит быстрых нейтронов. Насущной задачей является надёжное прогнозирование процесса искривления, обусловленного продольным растрескиванием блоков, и обоснование возможности безопасной эксплуатации реакторов в условиях прогрессирующего старения графитовой кладки.

Имеющиеся сегодня прогнозы, основанные на анализе свойств графита и на сопоставлении существующего состояния и условий эксплуатации кладок с другими реакторами, позволяют сделать следующий вывод. Процесс дальнейшего искривления колонн графитовых кладок, сопровождаемый растрескиванием блоков, не вызовет существенных трудностей для нормальной эксплуатации реакторов АДЭ-4 и АДЭ-5 до планируемой остановки, связанной с созданием замещающих энергоисточников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белянин Л.А., Лебедев В.И., Шмаков Л.В., Скок Ю.Г. Безопасность АЭС в изобретениях. — М.: Энергоатомиздат, 1998. — 208 с.
2. Белянин Л.А., Лебедев В.И., Гарусов Ю.В. и др. Барьеры безопасности на АЭС с каналными реакторами. — М.: Энергоатомиздат, 1997. — 192 с.
3. Березюк А.И., Тимонин А.И. Формоизменения кладок промышленных уран-графитовых реакторов и их безопасность при эксплуатации // Атомная энергия. — 2002. — Т. 92. — Вып. 4. — С. 291–298.