

УДК 621.039.524.44:539.43

ВИБРАЦИЯ КАК ФАКТОР, СПОСОБСТВУЮЩИЙ РАСТРЕСКИВАНИЮ ХОЛОДНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ПГВ-1000

Вереземский В.Г. (ВНИИАЭС)

В настоящем сообщении использованы результаты обобщений и многочисленных исследований [1, 2], в которых признается, что явление повреждения холодных коллекторов является сложным и многофакторным. Между тем утверждается, что важное значение для объяснения причин повреждения имеет температура эксплуатации холодных коллекторов (280—290 °С), при которой влияние коррозионной среды проявляется максимально. При этом оказывается упущенным то обстоятельство, что, с одной стороны, причина растрескивания ранее была признана многофакторной, с другой, недостаточно проанализированной остается вибрация, из-за которой наиболее часто наблюдаются случаи растрескивания металла оборудования.

Каждый конструкционный элемент обладает массой и упругостью и потенциально подвержен механической вибрации, хотя в проектных условиях нормальной эксплуатации все элементы реактора и системы первого контура рассматриваются как неподвижные или квазиподвижные (имеющие только возможность движения при температурном расширении).

Исходные данные о высокочастотном нагружении в соответствии с нормами [3] получают после обнаружения вибрации при эксплуатации и анализа результатов измерений, выполненных на соответствующем элементе с последующим необходимым расчетом. Другими словами, в ходе эксплуатации необходимо выявить вибрацию, собрать исходные данные для расчета, провести расчет, а затем при необходимости принять решение о дальнейшей эксплуатации.

Источником вибрации, очевидно, являются насосы и движущийся теплоноситель [4]. То, что вибрация оборудования и трубопроводов инициируется ГЦН, турбулентностью и стоячими волнами давления в теплоносителе и паре главных паропроводов, а также кипением в парогенераторе, не вызывает сомнения. Следует заметить, что за год до начала растрескивания холодных коллекторов ПГВ-1000 — в 1985 г. на первом энергоблоке Запорожской АЭС была обнаружена значительная вибрация главных паропроводов, ответственной за которую была признана гидроакустическая пульсация давления в паре [5, 6].

Вероятнее всего, ситуация, приведшая к растрескиванию холодных коллекторов, может быть представлена следующим образом.

При работе реакторной установки в переходных и стационарных режимах в результате пульсации давления на оборотной и кратных частотах ГЦН вследствие образования стоячих волн давления в первом контуре и паропроводах оборудование первого контура, главные циркуляционные трубопроводы и главные паропроводы оказались охваченными вибрацией разной интенсивности. Представляется, что наиболее слабым местом при этом оказались холодные коллекторы парогенераторов на некоторых энергоблоках АЭС России и Украины. На других блоках с ВВЭР-1000 либо качество изготовления оказалось выше, либо монтаж и раскрепление оборудования оказались лучше, либо и то и другое вместе взятое, но вибрация к растрескиванию коллекторов не привела ни на одном парогенераторе Ровенской, Хмельницкой, Калининской АЭС и АЭС «Козлодуй» (Болгария).

При пусконаладочных работах на головном блоке большой серии ВВЭР-1000 — первом блоке Запорожской АЭС обратили внимание на повышенную вибрацию главных паропроводов в помещении между защитной оболочкой и машинным залом. Наблюдали самопроизвольное срабатывание предохранительных клапанов, разбалансировку механизмов включения ПК, БРУ-А. Аналогичная интенсивная вибрация паропроводов в 1985—1986 гг. отмечалась на втором блоке Запорожской и первом блоке Балаковской АЭС. В течение 1985—1986 гг. на первом блоке Запорожской АЭС были измерены вибрации и пульсации пара в паропроводах при разной мощности [5].

С октября 1986 г. и до 1991 г. в эксплуатации находилось 97 парогенераторов ПГВ-1000, из которых на 24 обнаружены трещины в металле перемычек холодных коллекторов. В 1995 г. обнаружены трещины на ПГ-3 второго блока Балаковской АЭС. Трещины во всех случаях обнаружены со стороны второго контура в области над неперфорированным клином. Непосредственно у вершины клина и в первых рядах по его боковым сторонам растрескивание произошло на 16 холодных коллекторах ПГВ-1000, в шести случаях трещины были обнаружены в средней части коллекторов над клином, в трех случаях растрескивание обнаружено как непосредственно около клина, так и в средней части над клином.

Следует отметить, что не на всех блоках ВВЭР-1000 эксплуатируемых АЭС, а также не у всех парогенераторов произошло растрескивание. В таблице отмечены парогенераторы, на которых растрескались холодные коллекторы большой и малой серии. Обращает на себя внимание растрескивание холодных коллекторов с образованием трещин ПГ-2 на всех блоках большой серии, а также ПГ-3 малой серий. Водно-химический режим на всех парогенераторах блоков, где образовались трещины, одинаков. Водно-химический режим также приблизительно одинаков на АЭС, где имеются блоки с трещинами на холодных коллекторах некоторых парогенераторов и блоки без таковых. Таким образом, трудно объяснить избирательность коррозионного влияния водно-химического режима на металл, связанную либо с определенным номером парогенератора, либо с номером блока на АЭС, если не учитывать вибрацию.

Парогенераторы ПГВ-1000 с трещинами в холодных коллекторах

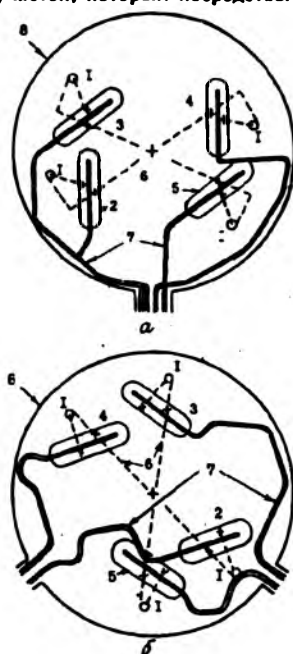
Блок АЭС	Номер парогенератора			
	1-й	2-й	3-й	4-й
Компоновка ГЦК малой серии				
Ново-Воронежская АЭС, пятый	+	+	+	+
Южно-Украинская:				
первый 1-го комплекта	+		+	
» 2-го комплекта			+	
второй 1-го комплекта	+	+	+	+
Компоновка ГЦК большой серии				
Запорожская АЭС:				
первый		+		+
второй	+	+		+
третий	+	+		
Балаковская АЭС:				
первый	+	+		
второй		+	+	

Конструирование головного ВВЭР-1000, а также серийных блоков опиралось на представление о квазистатической работе основного толстостенного оборудования и об отсутствии влияния вибрации на ресурс металла трубопроводов, парогенераторов, паропроводов и других крупногабаритных узлов и элементов первого контура. Горячая нитка ГЦТ представляет собой короткий и прямой участок, который посредством колена переходит в вертикальный горячий коллектор. Холодная нитка имеет более сложную конфигурацию и включает U-образный участок ГЦТ от ГЦН до парогенератора. Вертикальная плоскость этого участка ГЦТ расположена под прямым углом к продольной оси парогенераторов в компоновках как малой, так и большой серии (см. рисунок). Компоновки определяют хорошие компенсационные возможности холодных ниток петель и подвижность парогенераторов в отношении вращения вокруг вертикальной оси, проходящей через ось горячего коллектора, что отмечалось в результатах исследований, выполненных для головного блока ВВЭР-1000 на Ново-Воронежской АЭС [7, 8].

Принимая во внимание, что парогенератор приблизительно в 4 раза массивнее ГЦН, который, в свою очередь, почти в 10 раз массивнее U-образного участка ГЦТ, а коллектор является продолжением ГЦТ и масса его в несколько раз меньше массы этого участка ГЦТ, место соединения коллектора и ГЦТ, очевидно, может являться узлом форм колебаний. В соответствии с этим незначительная вибрация узла формы колебания может вызывать значительно более сильную вибрацию самого коллектора в направлении поперек продольной оси парогенератора. К тому же это направление совпадает с плоскостью как U-образного участка ГЦТ, так и минимальной жесткости конструкции, состоящей из коллекторов и трубок парогенератора. Препятствием к колебаниям в этом направлении могут служить только жесткие неперфорированные клины коллекторов.

Теплообменные петли, а следовательно, и парогенераторы ВВЭР-1000 расположены под защитной оболочкой несимметрично, что определяет индивидуальную трассировку главных паропроводов. Внутри защитной оболочки главные паропроводы не имеют жестких неподвижных опор. Одним концом трубопроводы через рожки и сборный коллектор пара соединены жестко с парогенератором, другие концы паропроводов жестко закреплены в проходке через защитную оболочку. Наиболее протяженным в пределах защитной оболочки у малой серии является паропровод ПГ-3. Паропроводы ВВЭР-1000 большой серии в пределах защитной оболочки также значительно отличаются по длине и компоновке.

Коллекторы парогенераторов представляют собой толстостенные частично перфорированные тупиковые трубопроводы переменного сечения. В нижней части коллекторов со стороны корпуса парогенератора (ось III) пер-



Компоновка теплообменных петель и главных паропроводов ВВЭР-1000 малой (а) и большой серии (б): 1 — главные циркуляционные насосы; 2—5 — парогенераторы № 1—4; 6 — главные циркуляционные трубопроводы; 7 — главные паропроводы; 8 — защитная оболочка

форации нет. Различие в изгибной жесткости клина и перфорированной части коллектора может быть охарактеризовано объемным коэффициентом сплошности, который составляет 0,58. За счет различия жесткостей на границе клина при изгибе коллектора в направлении осей I—III будет происходить концентрированная деформация металла перемычек и растрескивание.

Нередко рассматривают коллекторы ПГВ-440 как наиболее трещиностойкие вследствие применения для них нержавеющей стали в отличие от коллекторов ПГВ-1000. При этом упускают из виду, что коллекторы ПГВ-440 существенно отличаются от ПГВ-1000 наличием конструкционных «стяжек». Стяжки представляют собой полосы неперфорированного металла утолщенной части коллекторов шириной 295 мм вдоль осей I и III у коллекторов ПГВ-440. Вдоль оси III стяжка представляет собой полосу, расположенную в продолжение вершины неперфорированного клина, стяжка в виде полосы вдоль оси I расположена по противоположной стороне коллектора. При колебаниях коллектора в плоскости осей I—III (поперек продольной оси парогенератора) обе стяжки определяют более высокую изгибную жесткость коллектора и препятствуют образованию острого концентратора напряжений и деформаций у вершины неперфорированного клина в коллекторах ПГВ-440. У коллекторов ПГВ-1000 стяжки составляют всего 14,5 мм (пропущен один вертикальный ряд отверстий).

Таким образом, при колебаниях коллекторов поперек продольной оси парогенератора на ПГВ-440 в зонах наибольших растягивающих и сжимающих напряжений металла оказываются вертикальные полосы металла без перфораций шириной около 300 мм. У коллекторов ПГВ-1000 таких полос нет (ширина стяжки 14,5 мм).

При исследовании причин растрескивания холодных коллекторов ПГВ-1000 влияние вибрации на уровень напряженного состояния коллекторов не исключалось из факторов, способствующих растрескиванию [2]. Для выяснения степени этого влияния проводились натурные исследования и измерения виброхарактеристик элементов контура и коллекторов.

По сигналам тензодатчиков, одинаково установленных на патрубках холодного и горячего коллекторов, вибронпряжения, как и средняя амплитуда вибросмещений фланцев холодного и горячего коллекторов, различаются в 3,5—4 раза. Параметры вибрации и пульсаций давления измеряли как на Калининской, Хмельницкой АЭС, АЭС «Козлодуй», где коллекторы не растрескивались, так и на блоках, где ранее образовались трещины и парогенераторы были заменены. Результаты принципиально не различаются, так как измерения проводили при нормальном режиме работы ГЦН первого контура; на режим работы турбины внимания не обращали и таких сведений нет. Между тем еще в 1985 г. на первом блоке Запорожской АЭС были измерены вибрации клапанов ПК-1, -2, БРУ-А и БЗОК при различных уровнях мощности и выявлен рост вибрации паропроводов при увеличении мощности турбины. Вибрацию измеряли на корпусах соответствующих клапанов, т.е. ПК-1, -2, БРУ-А, расположенных в верхних частях своих «бубликов» из подводящих трубопроводов. БЗОК же являются составной частью паропроводов и опираются на скользящие опоры, потому только их вибрация соответствует вибрации собственно паропроводов. Горизонтальные виброперемещения паропроводов (БЗОК) свидетельствуют, что наибольшая вибрация, достигающая 200—300 мкм, наблюдается именно на паропроводах второго и четвертого парогенератора.

Если сравнить эти данные с номерами парогенераторов первого блока Запорожской АЭС, где образовались трещины, то видно соответствие номеров паропроводов с вибрацией более 200 мкм и парогенераторов с растрескавшимися коллекторами (см. таблицу). Причем первоначально были обнаружены трещины на холодном коллекторе ПГ-2 (амплитуда вибрации 250—270 мкм), а через несколько месяцев и на холодном коллекторе ПГ-4 (амплитуда 130—205 мкм).

В спектрах пульсаций давления, тензонапряжений и виброперемещений фланцев холодных коллекторов есть значимые составляющие колебаний на оборотной частоте ГЦН 16,5 Гц и кратной частоте 33 Гц. Фактическая наработка до растрескивания холодных коллекторов составила 7—60 тыс. ч, так что можно ориентировочно подсчитать число циклов до образования трещин. При 7 тыс. ч и частоте 33 Гц число циклов составляет $8,3 \cdot 10^8$, при наработке 60 тыс. ч оно равно $7 \cdot 10^9$. Различие в наработке парогенераторов с трещинами в 9 раз для усталостной прочности небольшое, так как циклический ресурс подчиняется логарифмической шкале времени или числа циклов, а не линейной. Разброс же данных по наработке для поврежденных коллекторов на логарифмической шкале не превышает 10%. При таком представлении результатов очевидно, что в условиях нормальной эксплуатации ВВЭР-1000 для всех работающих парогенераторов сохраняется высокая вероятность возникновения трещин в холодных коллекторах. Эксплуатация энергоблоков на уменьшенной мощности может приводить к снижению вибрации и увеличению ресурса. Вероятно, что ограничения мощности, устанавливаемые по другим причинам, и работа АЭС на пониженной мощности увеличивают ресурс холодных коллекторов, чем объясняется отсутствие случаев растрескивания в 1992, 1993, 1994 гг. и появление новой трещины только в 1995 г.

Анализ конструкторской документации вместе с результатами исследований, выполненных с 1986 г., а также их обобщение выявили, по нашему мнению, лидирующую роль динамических нагрузок (вибрации) в исчерпании металлом холодных коллекторов циклической прочности и его растрескивании. Следовательно, мероприятия по повышению долговечности холодных коллекторов не в последнюю очередь должны быть направлены на снижение амплитуды вибрации и уменьшение циклических напряжений в районе вершины неперфорированного клина независимо у эксплуатируемых ПГВ-1000 или в новых усовершенствованных, как, например, ПГВ-1000У. Для уже эксплуатируемых парогенераторов необходимо проведение комплекса

расчетных и экспериментальных исследований на действующих блоках, направленных на определение допустимых параметров вибрации. Необходимо также провести разработку системы специального виброконтроля, которая позволит нормировать виброхарактеристики и управлять ресурсом холодных коллекторов в процессе эксплуатации. При разработке новых усовершенствованных парогенераторов целесообразно в конструкцию коллекторов внести изменения и предусмотреть повышение изгибной жесткости коллекторов в направлении осей I—III, например, устройством стяжек, аналогичных на коллекторах ПГВ-440.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стекольников В.В., Титов В.Ф. Причины повреждения коллекторов теплоносителя и меры повышения надежности парогенераторов ПГВ-1000. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 4, с. 312—320.
2. Титов В.Ф. Причины повреждения «холодных» коллекторов горизонтальных парогенераторов ПГВ-1000 и меры повышения их эксплуатационной надежности и ресурса. — Теплоэнергетика, 1993, № 12, с. 53—60.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7002-86. М., 1989.
4. Вибрация в ядерных реакторах (обзор). М., Информэнерго, 1973.
5. Самарин А.А., Карпенко Ю.В., Бережной А.Ю. и др. Устранение вибрации паропроводов. — Энергетик, 1988, № 5, с. 14—16.
6. Смирнов Л.В., Каплунов С.М., Овчинников В.Ф., Яскеяин А.В. Идентификация вибраций паропровода АЭС. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1989, вып. 3, с. 36—40.
7. Вerezemskiy В.Г., Грудев И.Д., Корнеева С.Н. Свободные колебания теплообменной петли первого контура ВВЭР-1000. — В сб.: Динамические деформации в энергетическом оборудовании. М., ИМАШ АН СССР, 1978, с. 28—36.
8. Вerezemskiy В.Г., Прудовский А.М., Корнеева С.Н. и др. Гидродинамика первого контура ВВЭР-1000. — Труды Гидропроекта, 1978, вып. 57, с. 115—122.

Поступило в Редакцию 10.04.97

Рефераты статей

УДК 621.039.58

Кузьмин А.М., Окуне В.С. Анализ областей самозащитенности ядерных реакторов в условиях неопределенности исходных данных. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 1, с. 3—7.

Исследуются влияние неточности в определении исходной информации на положение границы области внутренней самозащитенности. Выявлены общие закономерности смещения границы области при неопределенности данных о характере внешних возмущений, приводящих к аварийной ситуации, и данных, не связанных с этими возмущениями.

В качестве иллюстрации рассматривается область внутренней самозащитенности от аварий типа ATWS для традиционной компоновки быстрого реактора, полученная в условиях неопределенности исходной информации. Рис. 2, список лит. 7 назв.

УДК 539.173

Рыков В.А. Потери энергии осколков деления и эффект плотности в газовых средах при разной частоте столкновений. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 1, с. 7—12.

Исмерены потери энергии осколков деления ^{252}Cf в воздухе при различном давлении газа. Показано, что в измеренном интервале давления от 300 до 8000 Па частота столкновений в пределах ~ 10% не влияет на результаты. Полученные данные исполь-

зованы для расчета эффекта плотности в газе. Сравнение расчета с ранее полученными результатами показывает, что нелинейная зависимость ионных зарядов осколков деления от скорости и учет их потерь энергии существенно понижают эффект плотности. Рис. 3, табл. 1, список лит. 15 назв.

УДК 539.173

Рыков В.А. Зарядовое равновесие осколков деления после вылета из твердого тела в газ. — Атомная энергия, 1997, т. 83, вып. 1, с. 12—17.

В работе представлены результаты измерения ионных зарядов осколков деления после их вылета из источника и после прохождения через слои газа. При измерении зарядов для групп легких и тяжелых осколков использован метод отклонения заряженных частиц магнитным полем. Источник осколков — слой ^{252}Cf на тонкой пленке толщиной 150 нм. Давление газа изменяли от высокого вакуума до 24 Па, благодаря чему исследован процесс установления зарядового равновесия ионных зарядов осколков деления. Показано, что оно устанавливается быстрее, чем это следует из ранее полученных данных, и при переходе к равновесию наблюдается слабо выраженный минимум. Результаты эксперимента использованы для оценки сечений захвата электронов многозарядными ионами. Рис. 3, табл. 1, список лит. 14 назв.