

- means of the Monte Carlo method. — Phys. Atomic. Nuclei., 2012, v. 75, № 14, p. 1675—1678.
9. **Гуревич М.И., Шкаровский Д.А.** Расчет переноса нейтронов методом Монте-Карло по программе MCU. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2012. 154 с.

10. **Brown F.** On the use of Shannon entropy of the fission distribution for assessing convergence of Monte Carlo criticality calculations. — In: PHYSOR-2006, 2006. C081, p. 1—6.

Поступила в Редакцию 31.05.22

УДК 621.039.58

ПРИЧИНЫ НЕСТАЦИОНАРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ВАЛА ПОДВИЖНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИБР-2

*Сизарев В.Д., Огнерубов Д.А., Тимофеев С.В., Волков А.Е. (АО «НИКИЭТ», г. Москва),
Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. (ИМАШ РАН, г. Москва)
e-mail: vibro@nikiet.ru*

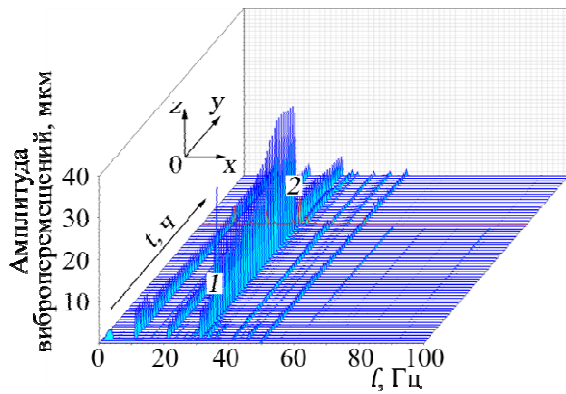
При эксплуатации подвижного отражателя исследовательского реактора ИБР-2 возник нештатный режим вращения ротора основного модулятора реактивности, который проявился в резком возрастании амплитуды осевых колебаний вала. Нештатный режим эксплуатации являющегося неотъемлемой частью реактора подвижного отражателя от цикла к циклу, продолжительность которого в среднем составляет 300 ч, возникал в первые часы вывода реактора на мощность. По истечении относительно небольшого промежутка времени интенсивность повышенных колебаний резко снижалась, и вал возвращался в исходный режим вращения. В режиме максимальных колебаний амплитуда кратно превышала значения, которые наблюдались в начальный период работы отражателя до начала вывода реактора и в первые часы работы на мощности. Этот нештатный режим, даже будучи кратковременным, может привести к сокращению жизненного цикла подвижного отражателя, расположенного в непосредственной близости к активной зоне. Это создает значительные трудности для выявления причин аномалии, которые заключаются в невозможности визуального контроля, ремонтных работ, замены неисправных конструктивных элементов и узлов в течение всего жизненного цикла эксплуатации [1—3]. В связи с отсутствием достаточной определенности в понимании деталей и причин возникших отклонений, а также роли различных факторов было проведено комплексное исследование, в состав которого вошли спектральный анализ колебательных процессов, теплофизический расчет температурных полей и расчетная оценка степени опасности повышенных колеба-

ний с позиций циклической прочности и долговечности.

Подвижный отражатель ПО-3 — многоступенчатая роторная машина. Подвижный отражатель ИБР-2 механического типа предназначен для генерирования импульсов реактивности, которые формируются при вращении двух соосно расположенных лопастей-модуляторов: основного и дополнительного. Импульс реактивности создается при угловом совпадении положения лопастей напротив активной зоны. Номинальная частота вращения основного модулятора составляет 600, дополнительного 300 об./мин. Направление вращения роторов встречное, при рассмотрении со стороны привода основной модулятор реактивности вращается по часовой, дополнительный — против часовой стрелки. Заданная частота вращения роторов обеспечивается от приводного двигателя через многоступенчатый редуктор. Передняя, ближайшая к активной зоне опора закреплена на жестком основании, задняя расположена в редукторе.

Роторы вращаются в замкнутом пространстве, ограниченном кожухом с мембраной. Внутренняя полость кожуха заполняется гелием концентрацией не менее 92%. С наружной стороны кожуха расположен корпус реактора, который находится в непосредственной близости от передней опоры.

Спектральный анализ. Спектральный анализ вибрационных процессов отражателя показал, что основной частотой осевых колебаний вала основного модулятора является частота встреч лопастей и динамических балансиров основного и дополнительного модуляторов, ко-



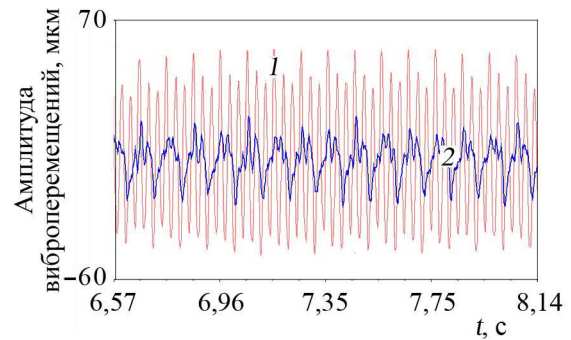
Р и с. 1. Динамика изменения почасовых спектров осевых колебаний вала основного модулятора реактивности на начальном этапе вывода реактора на мощность и в первые часы эксплуатации: 1, 2 — начало и окончание нестационарных колебаний соответственно

торая составляет 30 Гц. При встречном движении роторов в замкнутом пространстве кожуха, заполненном гелием, возникают газодинамические импульсы давления, действующие в осевом направлении. Длительность газодинамических импульсов давления определяется временем прохождения одной лопасти относительно другой при их встречном движении. На рис. 1 показан трехмерный спектр осевых колебаний вала основного модулятора реактивности, который иллюстрирует его динамику во времени. Принято следующее соответствие осей: x — частота, y — время, z — амплитуда. На частоте 10 Гц и ее кратностях выделяются составляющие, особенно высок уровень колебаний на частоте 30 Гц. К концу проявления нестационарных колебаний, как отчетливо видно по каскадному изображению спектров осевых колебаний вала, амплитуда данного компонента резко снижается до начальной 7 мкм. Временная реализация осевых колебаний вала основного модулятора реактивности для двух специфических моментов состояний показана на рис. 2.

По измеренному осевому смещению вала основного модулятора реактивности была дана расчетная оценка силовой нагрузки, действующей на лопасти основного и дополнительного модуляторов. В соответствии с законом сохранения импульса силы справедлива запись

$$F \Delta t = m \bar{V},$$

где F — сила; Δt — время действия импульса силы; $m = 727$ кг — масса ротора с лопастью основного модулятора реактивности; $\bar{V}$ =



Р и с. 2. Временная реализация осевых колебаний вала основного модулятора реактивности перед выводом реактора на мощность (1) и на начальном этапе после вывода на мощность (2) 8 апреля 2019 г. в 11 ч 16 мин и 20 ч 43 мин соответственно

$= 7,54 \cdot 10^{-3}$ м/с — средняя скорость осевых колебаний вала.

Длительность ударного импульса составляет $\Delta t \leq 5 \cdot 10^{-3}$ с. Подставляя значения параметров в формулу закона сохранения силы, получим силу

$$F = \frac{727 \cdot 7,54 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} \sim 1100 \text{ Н.}$$

При разогреве конструкции вместе с радиационным прогревом радиально-упорных подшипников передней опоры, корпуса передней опоры вала основного модулятора реактивности и опорной станины подвижного отражателя происходит неравномерный прогрев вала за счет теплопередачи со стороны лопасти основного модулятора реактивности. Неравномерный разогрев конструкции приводит к временному изгибу вала, а также нарушению соосности передней и задней подшипниковых опор вала основного модулятора реактивности. При выходе температуры подвижного отражателя в стационарное состояние прогиб вала уменьшается, соосность передней и задней подшипниковых опор возвращается к исходному состоянию. Если усилие от газодинамического импульса давления будет удовлетворять неравенству $F_x \geq F_{\text{тр}} = \mu P_n$, где μ — коэффициент сухого трения сталь по стали, то реакция от массовой нагрузки вала с лопастью в опоре составит $P_n \sim 4500$ Н, $F_{\text{тр}} = 450$ Н, и этих усилий достаточно для перемещения вала в зазоре. Следует добавить, что снижению статической реакции от массовой нагрузки способствует действие центробежных сил $F_{\text{ц.с}} = m\omega^2 r$. Важную роль при несимметричном расположении лопасти относительно опор вала играет еще

один силовой фактор — гироскопический момент $M_g = I_y \omega^2 \alpha$, где I_y — полярный момент инерции ротора относительно своей оси; ω — угловая частота вращения ротора; α — угол отклонения лопасти от вертикальной плоскости. Суммарное действие усилий, действующих в осевом направлении вала, при разогреве конструкции превышает действие статических усилий. После выравнивания температуры вала и подшипниковых опор соотношение динамических и статических сил уменьшается и начинают превалировать статические. В результате осевые колебания снижаются.

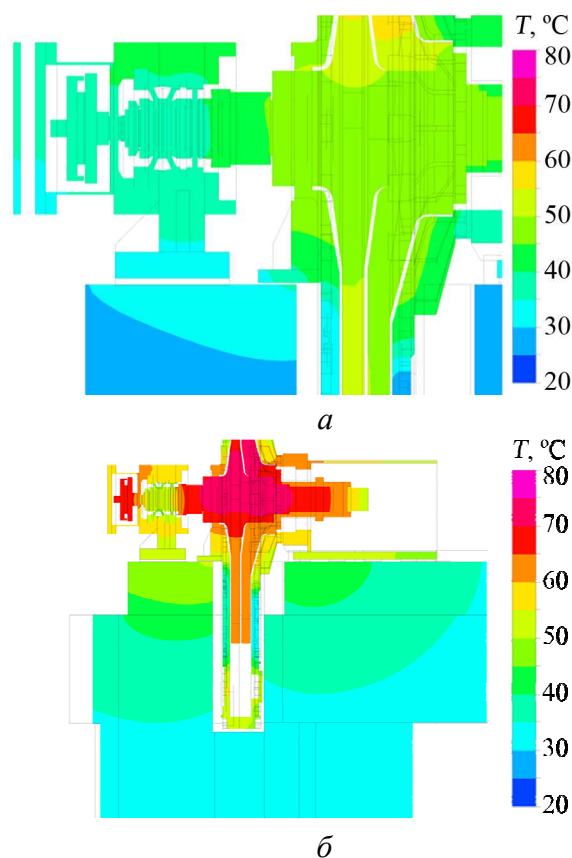
Таким образом, совокупность одновременно действующих факторов дает основание утверждать, что температурное поле в металле опоры, лопасти и вала при сочетании всех нагрузок создает условия для возникновения повышенных осевых колебаний вала.

Теплофизический расчет. Для понимания роли нестационарности температурных полей, возникающих при радиационном разогреве, и их вклада в появление осевых колебаний вала повышенной интенсивности был выполнен теплофизический расчет. В программном комплексе ANSYS 17.0 (США) была разработана высокопроизводительная трехмерная твердотельная модель подвижного отражателя. В нее были включены модели следующих узлов: вал—лопасть основного и дополнительного модуляторов реактивности, кожух и передняя опора подвижного отражателя, редуктор и опорная станина. Для точной калибровки и замыкания тепловой нестационарной расчетной модели подвижного отражателя ИБР-2 использовалась измеренная температура газа в объеме кожуха, передней и задней опор основного и дополнительного модуляторов реактивности, воды, охлаждающей кожух. Основное внимание было уделено передней опоре, в которой закреплен вал основного модулятора реактивности в двух радиально-упорных и одном радиальном подшипниках.

Проведен пошаговый по времени теплофизический расчет, по результатам которого дан анализ изменения температурных полей до наступления стационарного состояния. Расчеты позволили вычислить поля температуры в пределах модели подвижного отражателя в разное время. Теоретический анализ подтвердил пред-

положение о том, что главной причиной появления осевых нестационарных колебаний вала основного модулятора реактивности являются неустановившиеся температурные деформации, возникающие в результате радиационного разогрева передней опоры и вала во время вывода на номинальную мощность реактора до выхода на стационарный температурный режим. Распределение температуры по объему подвижного отражателя в промежуточном состоянии и при достижении стационарного режима показано на моделях (рис. 3).

Спектральный анализ осевых колебаний вала основного модулятора реактивности и теплофизический расчет подтверждают, что основная причина возникновения временных осевых виброперемещений системы вал—лопасть повышенной интенсивности определяется совокупностью факторов разной физической природы. К механическим факторам можно отнести как наличие технологических зазоров в подшипниковых опорах вала, которые были заложены при



Р и с. 3. Распределение температуры в объеме расчетной модели для двух состояний — спустя 12 ч после начала вывода реактора на мощность (а) и при достижении стационарного режима теплообмена после выхода на номинальную мощность (б)

производстве изделия, так и износ оборудования, что при определенных перекосах температурных полей передней опоры, вала и лопасти основного модулятора реактивности способствует созданию условий для роста осевых колебаний вала. В результате неравномерного разогрева элементов конструкции с последующим неравномерным тепловым расширением в начале работы установки в первую очередь прогреваются передняя опора и одна сторона лопасти, происходит нарушение соосности передней и задней опор вала основного модулятора реактивности.

Совместно с этим неравномерность разогрева вала и лопасти приводит к прогибу вала. Кроме того, к лопасти прикладывается осевая сила, вызванная газодинамическими эффектами при встречном движении лопастей и балансиров основного и дополнительного модуляторов реактивности в гелиевой среде с частотой, втрое превышающей частоту вращения вала основного модулятора реактивности. Вращение прогнутого вала в несоосных опорах, воздействие периодических газодинамических сил, а также влияние центробежных сил и гироскопического момента приводят к появлению периодических колебаний вала, направленных вдоль его оси.

По мере прогрева элементов конструкции поле температуры выравнивается, следовательно, отклонение от несоосности передней и задней опор вала основного модулятора реактивности уменьшается, снижается также прогиб вала. В результате этого амплитуда осевых виброперемещений вала снижается до исходного значения, как видно на рис. 1.

Прочностной расчет. Для обоснования долговечности элементов конструкции с учетом дополнительной нагрузки, возникающей при возбуждении повышенной интенсивности осевых колебаний вала основного модулятора реактивности, линейно-спектральным методом был выполнен расчет с использованием программного комплекса «Зенит-95». Наибольшее внимание уделялось радиально-упорному подшипнику как наиболее слабому узлу с позиций прочности. Совокупность действующих на подшипник радиальных и осевых нагрузок в расчетах долговечности обычно сводят к одной радиальной нагрузке, называемой приведенной. Под приведенной понимают некоторую постоянную условную радиальную нагрузку, при которой

ресурс подшипников оказывается таким же, как и при фактически действующих радиальной и осевой нагрузках.

Приведенная или эквивалентная нагрузка P определяется функциональной зависимостью $P = (\rho\beta F_r + \chi F_a) K_B K_T$, где ρ, χ — коэффициент радиальной и осевой нагрузки соответственно; F_r, F_a — радиальная и осевая нагрузка подшипника соответственно; β — коэффициент вращения; K_B — коэффициент безопасности, учитывающий влияние динамичности нагрузки на долговечность подшипника; K_T — температурный коэффициент, учитывающий влияние температуры на долговечность подшипника.

Суммируя силы по телам качения, вычисляется полная осевая сила F_a , возникающая в радиально-упорном подшипнике от действия радиальной нагрузки F_r . Дальнейшая расчетная оценка ведется по приведенной нагрузке, исходя из предположения, что осевую и радиальную нагрузку в блоке подшипников передней опоры воспринимают радиально-упорные подшипники. Такой подход идет в запас прочности. Осевая нагрузка, определяемая суммой двух составляющих — от движения вала в осевом направлении и от действия радиальной силы, запишется в виде

$$F_a = m\ddot{x} + \sum_i F_{r_i} \operatorname{tg} \alpha,$$

где m — масса ротора; $\ddot{x}$ — амплитуда виброускорения осевых колебаний вала; F_{r_i} — радиальная составляющая нагрузки, действующая на i -й шарик подшипника; i — число шариков; α — угол контакта радиально-упорного подшипника.

Таким образом, располагая этими составляющими, можно вычислить долговечность подшипников L по известной экспериментально установленной зависимости между нагрузкой P и долговечностью L [4]:

$$P^j L = \text{const},$$

где j — показатель степени кривой выносливости.

Используя связь грузоподъемности с известными справочными характеристиками подшипника, можно определить его ресурс.

Расчетный анализ прочности подшипникового узла подтвердил его работоспособность в условиях повышенной виброн нагруженности. Расчетная оценка циклической прочности вала и

лопасти с учетом дополнительной нагрузки в виде осевых колебаний вала основного модулятора реактивности повышенной интенсивности, не учтенной при обосновании прочности, показала, что требования норм прочности [4] выполняются, если суммарная накопленная повреждаемость a не превышает единицу. В результате было получено, что фактическая суммарная накопленная повреждаемость составила

$$\sum_{i=1}^n a < 0,8,$$

где n — число циклов по вибрационному нагружению. В расчетах на циклическую прочность с учетом повышенной вибрации вместо первых 40 ч за цикл эксплуатации их продолжительность принималась в течение полного времени цикла эксплуатации, что шло в запас прочности.

Резюмируя, можно утверждать, что установленный ресурс эксплуатации отражателя в условиях повышенных осевых колебаний вала основного модулятора реактивности на заданный срок обеспечен. В процессе эксплуатации отражателя рекомендуется проводить постоянный вибромониторинг его технического состояния.

Заключение. Исследованиями и расчетами определена причина повышенных осевых колебаний вала основного модулятора реактивности, возникающих сначала на коротком начальном этапе вывода реактора на мощность, затем в первые часы работы в стационарном режиме.

Причина заключается в переменных температурных деформациях, возникающих в результате радиационного разогрева передней опоры и основного вала отражателя в указанные интервалы длительности каждого цикла.

Расчетный ресурс радиально-упорных подшипников подтвердил возможность дальнейшей эксплуатации отражателя. Расчетный анализ показал, что условие прочности в соответствии с требованиями норм [4] для системы подшипниковый узел—вал—лопасть с учетом повышенных осевых колебаний вала основного модулятора реактивности выполняется. Ресурс отражателя на заданный срок эксплуатации обеспечен.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизарев В.Д., Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я. Поиск путей повышения эффективности вибромониторинга машинного оборудования на примере подвижного отражателя исследовательского ядерного реактора ИБР-2. — Новое в рос. энергетике, 2016, № 7, с. 6—21.
2. Сизарев В.Д., Лушиков В.И. Диагностика процессов механического износа ядерного оборудования на основе анализа радиоактивных примесей в масле. — В сб.: Надежность и долговечность машин и сооружений. Киев, ИПП НАН Украины, 2009, вып. 32, с. 144 — 152.
3. Соколова А.Г., Балицкий Ф.Я., Сизарев В.Д. Особенности вибромониторинга состояния машинного оборудования с использованием S-дискриминантов. — Контроль. Диагностика, 2020, т. 23, № 10, с. 4—11.
4. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002—86). М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

Поступила в Редакцию 24.05.22

УДК 621.039.526

ВЕРИФИКАЦИЯ И ВАЛИДАЦИЯ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО И НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКОГО ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМОВ В ТЯЖЕЛОВОДНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

Давыдов А.В., Козлов Р.В., Малкин С.А., Ушатиков А.С., Шкоков М.Г.

(АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород)

e-mail: malkin@okbm.nnov.ru

В активной зоне тяжеловодной реакторной установки при изменении положения рабочих органов и/или замене поглотителей может возникать сильная неравномерность нейтронного поля. При обосновании безопасности таких переходных режимов требуется проводить свя-

занный теплогидравлический и трехмерный нейтронно-физический расчет активной зоны. Для создания программного средства с такими возможностями были использованы теплогидравлический программный комплекс РАСНАР и нейтронно-физический программный комплекс