

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

К.Н. Проскуряков

Московский энергетический институт (технический университет), г. Москва



Разработана математическая модель параметрических колебаний в двухфазном теплоносителе АЭС, возникающих при периодическом изменении упругости. Получены соотношения для расчета критического значения модуляции акустической сжимаемости двухфазной среды, при достижении которой в контуре теплоотвода возбуждаются незатухающие колебания давления и расхода теплоносителя.

Критерий параметрической неустойчивости получен в безразмерном виде. Показано, что стабилизация течения достигается при определенных сочетаниях режимных параметров и геометрических характеристик активной зоны.

ВВЕДЕНИЕ

Создание надежных систем защиты АЭС при тяжелых авариях является актуальной задачей, от решения которой зависит будущее атомной энергетики.

Многочисленные исследования, проведенные к настоящему времени и планируемые на предстоящий период, основаны на совершенствовании методов моделирования и компьютерных кодов с целью адекватного описания термогидравлических процессов в системах аварийного охлаждения реакторов. В значительно меньшем объеме накапливаются экспериментальные данные, полученные на действующих моделях, имитирующих исследуемые процессы. Еще более ограничены возможности исследования на дорогостоящих объектах, являющихся полномасштабными аналогами реакторных установок и дающих наиболее достоверные данные о динамике режимных параметров исследуемых процессов. Именно эти данные позволяют обнаружить существенное расхождение экспериментально измеренных характеристик и ожидаемых расчетных. В частности это относится к различиям в описании колебаний давления и скорости теплоносителя на определенных этапах после срабатывания систем пассивной защиты, вызывающих циклические гидродинамические и тепловые нагружения оборудования. Необходимость более точного описания параметров колебательного процесса и выявления условий, необходимых для предотвращения их усиления, является важной задачей как для разработчиков этих систем, так и для персонала АЭС. Персоналу АЭС обеспечивается экспертная поддержка в принятии решений по управляющим воздействиям для стабилизации процесса теплоотвода. Высокие требования предъявляются к надежности систем безопасности в целях недопущения разрушения активной

© К.Н. Проскуряков, 2000

зоны и перехода к стадии запроектной аварии. Ввиду этого анализ работы систем охлаждения должен проводиться с учетом одновременного (хотя весьма мало вероятного) воздействия различных неблагоприятных факторов, таких как землетрясение, взрыв, автоколебания аварийных клапанов, закупоривание части активной зоны перемещающимися предметами, несрабатывание органов системы управления реактором и т.д.

Каждый из перечисленных факторов или их одновременное воздействие оказывает теплогидравлические влияния на параметры теплоносителя и спектр их колебаний. Целью проведенных исследований является определение теплогидравлических и режимных условий, при наличии которых в контуре охлаждения возбуждаются колебания параметров теплоносителя и происходит усиление вынужденных колебаний рабочей среды. Экспериментальные и аналитические исследования динамики режимных параметров (массового расхода среды, плотности среды, давления, перепадов давления, обусловленных гидравлическими сопротивлениями, энтальпии и т.д.) в гидравлических контурах, составляющих систему аварийного охлаждения реактора, показывают, что эти параметры изменяются во времени по определенному закону.

Переходные процессы в системах аварийного охлаждения реактора длятся примерно 2500 с. Этот временной интервал состоит из нескольких этапов, на каждом из которых осредненные значения режимных параметров известны.

При аварии, вызванной разрывом холодной петли, давление в реакторе уменьшается вплоть до давления насыщения, и в активной зоне возникает кипение. В этом режиме активная зона представляет собой парогенерирующий канал (ПГК), в котором сечение закипания делит канал на две части: заполненную водой и заполненную пароводяной смесью, которая обладает большой сжимаемостью.

ИССЛЕДОВАНИЕ

В [1] для исследования динамических процессов в ПГК предложена модель масса-пружина и показано, что ПГК является генератором колебаний давления с собственной частотой

$$\Omega = \frac{1}{\sqrt{m \cdot C_0}}, \quad (1)$$

где m – акустическая масса, C_0 – акустическая емкость.

В [2] показано, что при изменении давления в реакторе по закону $P(t) = P_0 + P_a \cdot \sin \Omega \cdot t$ и с учетом

$$\frac{P_a}{P_0} = \chi \text{ и } \frac{\text{const}}{P_0} = C_0, \quad (2)$$

где индекс a относится к амплитуде параметра, 0 относится к значению параметра в начальный момент времени, χ – коэффициент модуляции параметра, получено следующее соотношение:

$$C(t) = C_0 \frac{1}{1 + \omega \sin(\Omega t)}. \quad (3)$$

В процессе эксплуатации гидравлические элементы контура циркуляции теплоносителя или рабочего тела в системах АЭС находятся под воздействием периодических возмущений по давлению (расходу), а источниками возмущений являются колебания перекачиваемой насосами среды, вибрации конструкций, пульсации теплового потока, автоколебания параметров теплоносителя, колебания оборудо-

дования, образование вихрей в потоке среды и т.д. Каждый источник возмущения вызывает в теплоносителе колебания давления (расхода) с соответствующими частотой и амплитудой. В реальных условиях число таких источников, как правило, значительно. При малых колебаниях давления, скорости или температуры двухфазного теплоносителя наиболее существенно изменяется акустическая сжимаемость двухфазной среды. С учетом этого для получения достоверных результатов необходимо проанализировать линейное дифференциальное уравнение с периодическими коэффициентами, соответствующее рассматриваемому контуру циркуляции [2]:

$$\frac{d^2V}{dt^2} + 2\alpha \frac{dV}{dt} + \omega_0^2(1 + \chi \cos \Omega t)V = 0, \quad (4)$$

где $\omega_0^2 = \frac{1}{mC}$, $\alpha = \frac{r}{2m}$, V - объем двухфазной смеси, ω_0 - собственная частота колебаний теплоносителя в контуре, r - акустическое сопротивление, C - акустическая емкость, m - акустическая масса в контуре. Метод расчета m , r и C разработан в [1].

Свойства таких уравнений исследованы Матье. Из теории уравнений Матье следует, что для самовозбуждения параметрических колебаний в контуре минимальное значение $\chi_{кр}$ требуется в том случае, если частота возмущения давления в контуре в два раза меньше частоты изменения акустической емкости. В исследуемом случае это выполняется, поскольку внешнее возмущение, вносимое в контур с частотой ω , вызывает появление колебаний с кратными (2ω , 3ω) и комбинационными частотами [1]. Таким образом, возникающий спектр частот оптимален для самовозбуждения колебаний в контуре при внешнем возмущении гармонического типа с частотой, равной собственной частоте колебаний давления (расхода) теплоносителя, или при возмущении, вызванном иным источником периодических колебаний.

Уравнение (4) дает возможность установить граничные условия для самовозбуждения параметрических колебаний. Предполагая, что α - малая величина (добротность контура циркуляции высокая) и $\Omega = 2\omega_0$, эти граничные условия определяются критическим значением параметра χ ($\chi_{кр}$). При $\chi \geq \chi_{кр}$ происходит самовозбуждение параметрических колебаний. Решением уравнения Матье в этом случае является

$$\chi_{кр} = 2r \sqrt{\frac{C}{m}} = \frac{2}{Q} = 2\delta, \quad (5)$$

где Q - добротность, δ - коэффициент затухания колебаний в контуре. Критическая величина коэффициента модуляции соответствует граничному условию, при достижении которого возникают параметрические колебания в теплоносителе. Опуская промежуточные преобразования получим

$$\chi_{кр} = \frac{w_{см}}{a_{см}} \left(\frac{\rho_{см}}{\rho_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta h_{вых}}{\Delta h_{вх}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\xi_{тр} \frac{l}{d} + \Sigma \xi_M \right). \quad (6)$$

Здесь $\Delta h_{вых} = h_{вых} - h_{нас}$ и $\Delta h_{вх} = h_{нас} - h_{вх}$, где w - скорость потока, a - скорость распространения малых колебаний давления, $\xi_{тр}$ - коэффициент трения, ξ_M - коэффициент местных сопротивлений, h - энтальпия теплоносителя, l - длина обогреваемого элемента, d - гидравлический диаметр элемента; индексы: см - смесь, вых - выход, вх - вход, нас - насыщение, в - вода. Из (2) и (6) следует

$$P_a^{кр} = P_0 \frac{w_{cm}}{a_{cm}} \left(\frac{\rho_{cm}}{\rho_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta h_{вх}}{\Delta h_{вх}} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\xi_{TP} \frac{l}{d} + \Sigma \xi_M \right). \quad (7)$$

При отсутствии местных сопротивлений выражение (7) принимает вид

$$P_a^{кр} = \xi_{TP} P_0 \frac{l}{d} \frac{V_{cm}}{a_{cm}} \left(\frac{\rho_{cm}}{\rho_B} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\Delta h_{вх}}{\Delta h_{вх}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

При $P_a < P_a^{кр}$ может иметь место усиление внешних возмущений за счет резонансного взаимодействия. Колебания теплоносителя могут совпадать с собственными частотами колебаний оборудования или его отдельных узлов (резонансное взаимодействие оборудования и теплоносителя). В этих случаях происходит увеличение амплитуды колебаний как теплоносителя, так и самого оборудования. Вероятность наступления таких режимов повышается при изменении условий крепежа узлов оборудования в процессе эксплуатации, а также в переходных процессах. Даже кратковременное существование резонансных взаимодействий между теплоносителем и оборудованием (например, при переходных режимах) может существенно повлиять на снижение ресурса оборудования и/или конструктивных узлов, а в некоторых случаях стать причиной аварии. Для оптимизации режимов эксплуатации и продления срока службы оборудования АЭС необходимо поддерживать условия, предотвращающие совпадение частот возникающих в теплоносителе колебаний с собственными частотами оборудования или его узлов. Нелинейные гидравлические элементы обладают свойством преобразования частоты, заключающемся в том, что спектральная функция отклика на гармоническое воздействие содержит новые частоты, которых нет в составе действующих источников колебаний. Особое значение преобразование частоты внешнего возмущения по давлению или расходу теплоносителя приобретает в случае анализа теплогидравлических процессов при тяжелых авариях. В этих условиях существенно расширяется набор кратных и комбинационных частот, который определяется типом гидравлических характеристик элементов контура охлаждения и зависит от наличия паровой фазы.

ВЫВОДЫ

Предложенная модель дает математическое описание механизма возбуждения параметрических колебаний при периодическом изменении сжимаемости пароводяной смеси. Частота этих колебаний зависит не только от параметров теплогидравлических процессов, но и от геометрических размеров системы теплоотвода и стадии процесса расхолаживания активной зоны. Из анализа модели следует, что феномен параметрических колебаний проявляется при некоторых определенных сочетаниях названных выше факторов. Детализированный перечень этих факторов включает в себя интенсивность парообразования, структуру двухфазного потока, конфигурацию и размеры элементов, образующих систему аварийного расхолаживания, момент срабатывания параллельно работающих устройств и т.д.

Критерий возникновения параметрических колебаний получен в безразмерном виде.

Литература

1. *Проскуряков К.Н.* Математические модели источников теплогидравлических возмущений в контурах АЭС// Теплоэнергетика. – 1999. - №6. - С.6-11.
2. *Proskouriakov K.N.* Mathematical Model of Coolant Parametrical Oscillations in Passive Safety Systems/ Post Smirt 14 International Seminar 18 (Piza, Italy, 1997. August 25-27, P.E. 1.33 – 1.36).
3. *Проскуряков К.Н., Устинов А.К.* Создание научной базы акустической диагностики теплогидравлических процессов в оборудовании АЭС// Вестник МЭИ. - 1996. - №3. – С. 51-61.

Поступила в редакцию 29.02.2000

Neutron multiplication coefficients for transuranics in various neutron spectra are calculated. Corresponding neutron cross-section data are taken from the new Russian group data set ABBN-93 in comparison with the national evaluated nuclear data libraries BROND-2, ENDF/B-VI, JEF-2 and Jendl-3. It is shown that in a fission neutron spectrum without any moderation, the most of transuranics have high coefficients of neutron multiplication $K \geq 1$. In the standard fast reactor spectrum with a lead coolant some plutonium isotopes keep their high fissile features while minor actinides, Np-237, Am-241, Am-243 and plutonium isotope Pu-242 are characterized by very low coefficients of neutron multiplication, $K \ll 1$. The ways for incineration of minor actinides in hard neutron spectra are also discussed.

УДК 621.039.7

On Significance of Principle of Radiation Equivalence between Mined Uranium and Radiowastes Buried \A.N. Shmelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 9 titles.

Significance of principle of radiation equivalence between uranium mined and radiowastes buried in study of future large scale nuclear power fuel cycle is analyzed. It is concluded that the role of this principle could be negligible in appropriate fuel cycle.

УДК 621.643.536.24

Efficiency of Heat-Exchange of Transversally Streamlined Pipe Bundles with Different Schemes of Surface Element Location \V.T. Buglaev, A.K. Anisin, A.A. Anisin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 3 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of heat-aerodynamic characteristics of convective surfaces as pipe bundles of different diameters under change of their orientation angle relatively to coolant flow are given. On the basis of the analysis of the obtained data methods to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices are offered.

УДК 51-74:621.039.534

Simulation of Parametric Oscillations in a Cooling System of Nuclear Reactors \K.N. Proskuryakov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 5 pages. – References, 3 titles.

The mathematical model of parametric oscillations in the two-phase coolant appearing at periodic elasticity change is developed. The relations for calculation of critical value of modulation of an acoustical compressibility of the two-phase medium when undamped oscillations of pressure and coolant consumption appear.

УДК 621.039.517.5

Experimental Research of Temperature Fields on Inner Surface of Technological Channel of the RBMK-Reactor by Thermoscanning Method \A.I. Trofimov, I.A. Chusov, M.A. Trofimov, I.A. Shevtsov, S.P. Pashkov, V.V. Maksimovskiy, A.Ja. Ustujanin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 12 pages, 14 illustrations, 2 tables. – References, 6 titles.

Results of experimental research of allocation of temperature on inner wall of the technological channel are given. It is shown, that the thermoscanning method allows to define change of clearance between the technological channel and graphite on change of temperature fields on the inner surface of the technological channel. The results of experiments with water and air as the coolant and different types of scanners are given.