

6. Жиганов А.Н., Гузев В.В., Андреев Г.Г. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Учеб. пособие. Томск, 2002. 328 с.
7. Сидорова И.В., Горохов Л.М. Молекулы $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ в системе $\text{U}-\text{O}-\text{H}$ и влияние паров воды на скорость испарения диоксида урана. — Физ. химия, 1998, т. 72, № 7, с. 1167—1169.

Поступила 11.09.07

В окончательной редакции 22.01.09

УДК 621.039.51

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕЖКАНАЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ПРИ МАЛОМ ПАРОСОДЕРЖАНИИ

Кресов Д.Г. (ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

Основные механизмы, ответственные за гидродинамические неустойчивости в каналах активной зоны водо-водяных ядерных энергетических установок, хорошо известны — это положительная и отрицательная обратные связи, выявленные для области высокого паросодержания и обусловленные наличием местных гидравлических потерь [1], а также отрицательная обратная связь в каналах с малым паросодержанием [2], не требующая для реализации механизма обязательного наличия гидравлических потерь на горячем участке трассы [3]. Для последнего механизма (ему и посвящена работа) существенно, что превышение модулем коэффициента усиления цепи единицы обусловлено сильной нелинейной зависимостью плотности от энтальпии на границе кипения. Это дает основание ожидать резкий характер возбуждения колебаний со снижением их амплитуды по мере увеличения истинного объемного паросодержания. Вместе с тем на практике зачастую наблюдается либо апериодический срыв расхода, либо плавный характер роста амплитуды по мере увеличения объемного паросодержания. Поэтому целесообразно уточнить условия реализации колебаний расхода при малом паросодержании, а расширение предсказательных возможностей модели-механизма неустойчивости [3] правомерно ожидать при дополнительном учете положительной обратной связи в цепочке расход—плотность—гидравлические потери (как функция плотности)—расход.

Действительно, для автомодельного режима течения возмущение гидравлических потерь на выходе из нагревателя можно представить в виде, аналогичном полученному в работе [1]:

$$\begin{aligned}\delta\Delta p(G, \gamma) &= 2\zeta \frac{G_0}{\gamma_0} \delta G - \zeta \frac{G_0^2}{\gamma_0^2} \delta\gamma = \\ &= 2\zeta \frac{G_0}{\gamma_0} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta i_0}{\gamma_0} \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|_{\gamma_0, P_0} \right] \delta G,\end{aligned}$$

где G — расход теплоносителя через канал, кг/с; γ — плотность теплоносителя на выходе из нагревателя, кг/м³; ζ — коэффициент местных потерь на выходе из нагревателя, м⁻⁴; Δi — разница энтальпии на границах нагревателя, кДж/кг; $\partial\gamma/\partial i$ — частная производная плотности по энтальпии, кг²/(м³·кДж); индексом 0 обозначены невозмущенные переменные.

В однофазном случае (величина $\partial\gamma/\partial i$ мала) цепь расход—потери—расход образует отрицательную обратную связь, действующую без задержки и в силу этого препятствующую возникновению неустойчивости. При вскипании величина $\partial\gamma/\partial i$ существенно возрастает с возможностью соответствующего изменения знака обратной связи и, как следствие, дестабилизации системы. Рассматривая, как в работе [2], упрощенную модель с однофазным точечным нагревателем и двухфазным необогреваемым участком над ним, можно отметить следующее. Местные потери на входе в необогреваемый участок образуют положительную обратную связь, действующую без временной задержки и способствующую развитию апериодической неустойчивости. Потери на выходе образуют запаздывающую положительную обратную связь, ослабляющую исследуемую тоже запаздывающую отрицательную обратную связь. Таким образом, необязательные для проявления обсуждаемого механизма потери могут оказаться решающими для его реализации.

Будем называть канал, в котором развивается неустойчивость, активным. К пассивным будем относить каналы с некипящим теплоносителем активной зоны или трассы, включающие общие подъемные и опускные участки, а также парогенераторы. Для интегральной компоновки реактора петли теплообмена и неактивные каналы активной зоны могут выступать в качестве конкурирующих на роль замыкающих неустойчивый контур участков ввиду сопоставимости гидравлических потерь в зоне и петлях. В блочной компоновке замыкание неустойчивого контура циркуляции более вероятно через пассивные каналы при слабом возмущении общереакторного расхода.

Для уточнения механизма будем использовать предельно упрощенную модель, принципиально отличающуюся от принятой [2] способом описания транспортировки тепла с помощью инерционных звеньев (в отличие от чистого запаздывания). Повышение порядка модели при этом компенсируется упрощением процедуры нахождения границ различных типов устойчивости в системе, включающей одновременно несколько обратных связей.

Результаты анализа. Модель-механизм неустойчивости минимальной размерности без учета положительных обратных связей формулируется в следующем виде:

$$\begin{cases} i = i_x + \frac{N_0}{G}; \\ M \frac{di_1}{dt} = G(i - i_1); \\ M \frac{di_2}{dt} = G(i_1 - i_2); \\ M \frac{di_3}{dt} = G(i_2 - i_3); \\ Lg[\gamma_x - \gamma_3] = \zeta G^2; \\ \gamma_k(i_k) = -i_k \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|, \quad k = 1, 2, 3; \\ di_x/dt = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где i — энтальпия на выходе из нагревателя, кДж/кг; i_x — энтальпия на входе в нагреватель, кДж/кг; N_0 — мощность нагревателя, кВт; G — расход теплоносителя по контуру циркуляции, кг/с; M — масса теплоносителя на расчетном участке (принята одинаковой для всех участков), кг; i_k — энтальпия теплоносителя на выходе из k -го участка, кДж/кг; t — время, с; L — высота контура, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; γ_x — плотность теплоносителя на пассив-

ном участке, кг/м³; ζ — суммарный коэффициент гидравлических потерь контура циркуляции, (кг·м)⁻¹.

Использование энтальпии i_3 в качестве средней для необогреваемого участка некорректно (не учитывается динамика его верхней половины), но качественно не противоречиво и вынужденно по соображениям минимизации порядка системы.

Характеристическое уравнение линеаризованной системы (1)

$$p^3 + 3p^2 + 3p + Z + 1 = 0,$$

где $Z = Lg\Delta i \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right| / 2\zeta G_0^2$; $\Delta i = N_0/G_0$; $G = G_0 + \delta G$, с единственным нетривиальным условием устойчивости Рауса—Гурвица [4]

$$8 - Z > 0 \quad \text{или}$$

$$\left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right| < 16 \frac{\zeta G_0^2}{Lg\Delta i} = 16 \frac{\gamma_x - \gamma_3}{\Delta i} = 16 \frac{\Delta \gamma}{\Delta i}. \quad (2)$$

Для включения в систему положительных обратных связей расположим местные потери на выходе из нагревателя (ζ_n) и в середине необогреваемого участка (ζ_3) активного канала, учтя зависимость гидравлических потерь от соответствующей плотности. Тогда пятое уравнение системы (1) запишется в виде

$$Lg[\gamma_x - \gamma_3] = \zeta_n \frac{G^2}{\gamma} + \zeta_3 \frac{G^2}{\gamma_3} + \zeta \frac{G^2}{\gamma_x},$$

где ζ — коэффициент гидравлических потерь на пассивном участке контура, м⁻⁴.

Характеристическое уравнение полученной системы будет иметь вид

$$p^3 + 3p^2 + 3p + \frac{z - \alpha}{1 - \beta} + 1 = 0, \quad (3)$$

где $z = Lg\gamma_0 S^2 \Delta i \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right| / 2G_0^2$; $S^2 = \left(\zeta_x \frac{\gamma_0}{\gamma_x} + \zeta_n + \zeta_3 \right)^{-1}$; $\alpha = \zeta_3 S^2 \frac{\Delta i}{2\gamma_0} \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|$; $\beta = \zeta_n S^2 \frac{\Delta i}{2\gamma_0} \left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right|$;

γ_0 — невозмущенная плотность теплоносителя на необогреваемом подъемном участке.

Из уравнения (3) и с учетом правила знаков Декарта [5] следует, что два корня из трех комплексно-сопряженные: фазовый портрет соответствует фокусу или седлу-фокусу [6].

Условия устойчивости Рауса—Гурвица записываются в следующем виде:

$$\frac{z-\alpha}{1-\beta} > -1 \text{ и} \quad (4)$$

$$\frac{z-\alpha}{1-\beta} < \sigma, \quad (5)$$

где параметр $\sigma = 8$ для рассматриваемой системы третьего порядка.

Известные критерии [7] позволяют сделать следующие выводы. При нарушении условия (4) один из корней действительный и положительный, два других — комплексно-сопряженные с отрицательной действительной частью (траектории сближаются с расходящимися ветками седла, приводя к развитию аperiodической неустойчивости). При нарушении условия (5) один из корней действительный и отрицательный, два других — комплексно-сопряженные с положительной действительной частью (траектории удаляются от сходящихся веток седла, приводя к развитию колебательной неустойчивости).

Существенно, что при увеличении порядка системы (n) сохраняется возможность реализации аperiodического решения. Это следует из правила знаков Декарта и вида характеристических уравнений, в которых все коэффициенты, кроме свободного члена, положительны и соответствуют биномиальным:

$$p^n + np^{n-1} + \dots + \frac{n!}{(n-r)!r!} p^r + \dots + np + 1 + \frac{z-\alpha}{1-\beta} = 0,$$

а знак свободного члена, определяющего наличие или отсутствие положительного корня, зависит от параметров системы. Поэтому, в частности, условие (4) справедливо для любого порядка системы. Кроме того, параметр σ уменьшается с увеличением n , сужая область колебательной неустойчивости (рис. 1). С учетом полученного в работе [2] коэффициента усиления цепи для чистого запаздывания асимптотика представленной зависимости, по-видимому, равна единице.

Примем

$$\zeta_x \frac{\gamma_0}{\gamma_x} = m(\zeta_n + \zeta_3), \quad n$$

Р и с. 1. Фрагмент численно полученной зависимости правой части неравенства (5) σ от порядка системы уравнений n

где m — коэффициент, определяющий соотношение между местными потерями в активном канале и потерями в пассивных участках контура. Соответственно $m = 0$ будет означать, что гидравлические потери в контуре определяются активным каналом, $m = 1$ — равенство потерь в активной и пассивной частях контура. Тогда условия (4), (5) для $n = 3$ переписутся в физических переменных соответственно как

$$\left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right| < 16 \frac{\Delta \gamma}{\Delta i} \frac{\gamma_0}{\Delta \gamma} \frac{(1+m)(1+\chi)}{8\chi}; \quad (6)$$

$$\left| \frac{\partial \gamma}{\partial i} \right| < 16 \frac{\Delta \gamma}{\Delta i} \left(1 + \frac{\Delta \gamma}{\gamma_0} \frac{8\chi-1}{(\chi+1)(m+1)} \right)^{-1}, \quad (7)$$

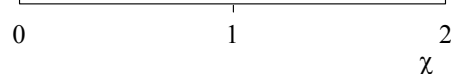
где $\chi = \zeta_n / \zeta_3$.

Удобно исходить из условия устойчивости (2). Тогда в правой части неравенств (6), (7) можно выделить множители K , которыми они отличаются от выражения (2):

$$K = \begin{cases} 1 & \text{для неравенства (2);} \\ \frac{\gamma_0 (1+m)(1+\chi)}{\Delta \gamma 8\chi} & \text{для неравенства (6);} \\ \left(1 + \frac{\Delta \gamma}{\gamma_0} \frac{8\chi-1}{(\chi+1)(m+1)} \right)^{-1} & \text{для неравенства (7).} \end{cases}$$

На рис. 2 построены качественные зависимости K для выражений (6), (7) как функции χ для двух значений m : 0 и 1. С точностью до общего множителя $16\Delta\gamma/\Delta i$ эти зависимости суть границы неустойчивостей по параметру $|\partial\gamma/\partial i|$.

Таким образом, дополнение системы (1) учетом положительной обратной связи привело к новому качеству: появлению границы аperiodической устойчивости. При этом из вида уравнений (2), (6), (7) следует, что при $m \rightarrow \infty$ новая система становится идентичной (1) со статическим коэффициентом усиления цепи (динамическая часть полного коэффициента усиления при едином подходе к способу описания запаздывания не изменяется и поэтому несущественна для сравнения):



Р и с. 2. Зависимость K от χ , иллюстрирующая условие реализации асимптотической — $m = 1$ (1), $m = 0$ (2) и колебательной неустойчивости — $m = 1$ (3), $m = 0$ (4)

$$K_{\text{ст}} = -\frac{\Delta i}{2\Delta\gamma} \left| \frac{\partial\gamma}{\partial i} \right|.$$

Очевидно, что эффекты, обусловленные особенностями распределения потерь по каналу, проявляются при не слишком больших значениях коэффициента, определяющего соотношение между потерями в активном канале и в пассивных участках контура, что и имеет место в реальных системах.

Локализация всех местных потерь в середине необогреваемого участка ($\chi \rightarrow 0$) повышает граничное значение $|\partial\gamma/\partial i|$, что обусловлено конкуренцией двух противоположных по знаку обратных связей (потерь и напора) в условиях искусственно созданного для них в модели равного времени запаздывания. Статический коэффициент усиления цепи минимален при $m = 0$:

$$K_{\text{ст}} = -\frac{1}{2} \left[\frac{\Delta i}{\Delta\gamma} - \frac{\Delta i}{\gamma_0} \right] \left| \frac{\partial\gamma}{\partial i} \right|.$$

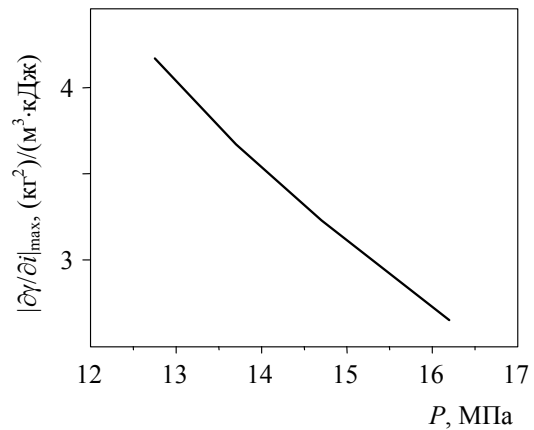
Принципиально, что даже в этом предельном случае компенсируется лишь часть отрицательной обратной связи: $K_{\text{ст}}$ остается ненулевой величиной, а значит, остается возможной реализация колебательного режима, по крайней мере, для не слишком высокого давления, характерного для PWR (рис. 3).

Существование потерь на выходе из нагревателя ($\chi \neq 0$) снижает граничное значение $|\partial\gamma/\partial i|$. Статический коэффициент усиления цепи в системе с потерями только на выходе из нагревателя ($\chi = \infty$) записывается в виде

$$K_{\text{ст}} = -\frac{\Delta i}{2\Delta\gamma} \left| \frac{\partial\gamma}{\partial i} \right| \left(1 - \frac{\Delta i}{2\gamma_0} \left| \frac{\partial\gamma}{\partial i} \right| \right)^{-1}.$$

Вместе с тем увеличение отношения потерь на выходе из нагревателя к потерям на необогреваемом участке канала сокращает область колебательной неустойчивости, что делает возможным исключение пульсаций расхода при вскипании теплоносителя.

Оказывается важным и характер распределения гидравлических потерь на необогреваемом участке. Правомерно рассматривать представленное размещение местных потерь (в середине участка) как соответствующее потерям на трение и ускорение. В реальных конструкциях присутствуют местные потери на выходе из не-



Р и с. 3. Фрагмент зависимости модуля частной производной плотности по энтальпии $|\partial\gamma/\partial i|$ на линии насыщения от давления, рассчитанной по данным [8]

обогреваемого участка с большим в 2 раза временем запаздывания положительных обратных связей и, как следствие, с меньшими запасами до колебательной неустойчивости. Этот вывод был подтвержден анализом модели четвертого порядка (в силу очевидности дополнения модели не приводятся). Получено, что при сохранении верхней границы периодической неустойчивости нижняя смещается к абсциссе в соответствии с соотношением

$$\left| \frac{\partial\gamma}{\partial i} \right| < 16 \frac{\Delta\gamma}{\Delta i} \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} \left(\frac{(8\chi - 1)}{(1+m)(1+\chi)} + \sqrt{\left[\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} \frac{1}{(1+m)(1+\chi)} \right]^2 + 1} \right)^{-1}.$$

Соотношения между местными выходными потерями и потерями на трение и ускорение могут определяться не только конструкцией, но и распределением паросодержания по высоте необогреваемого участка. Например, недогретый теплоноситель за счет самовскипания в верхней части необогреваемого участка увеличит местные гидравлические потери на его выходе, последующее распространение равновесного пара вверх по течению (к нагревателю) повысит потери на трение и ускорение с возрастанием вклада всех запаздывающих положительных обратных связей (на фоне снижения отношения потерь на выходе из нагревателя к потерям на необогреваемом участке канала). Следовательно, в динамике реализация колебательной не-

устойчивости может носить временный характер (рис. 4).

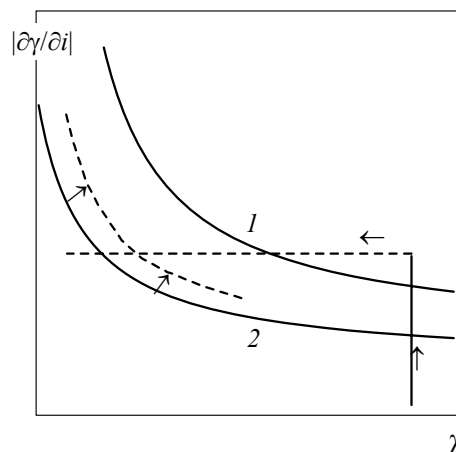
Таким образом, за счет расширения перечня учитываемых обратных связей уточнены условия реализации одного из известных механизмов гидродинамической неустойчивости в каналах активной зоны реактора. Показано, в частности, что область колебательной неустойчивости оказывается дополнительно ограниченной аperiодической неустойчивостью.

Учитывая известные сложности диагностирования на действующих станциях и неоднозначность проявления рассматриваемой неустойчивости, равно как и возможный излишний консерватизм расчетных методик, исследования целесообразно проводить в условиях, обеспечивающих выявление обеих границ колебательной неустойчивости. В соответствии с представленными в работе результатами этого можно достичь, предусматривая конструктивную возможность соответствующей перестройки распределения гидравлических потерь и рабочего давления в экспериментальном контуре.

Развитие работы планируется в направлении исследований характера развития колебаний за границей устойчивости в зависимости от распределения гидравлических потерь по контурам циркуляции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов И.И., Герлига В.А. Устойчивость кипящих аппаратов. М.: Атомиздат, 1969.
2. Митенков Ф.М., Кутыин Л.Н., Моторов Б.И., Самойлов О.Б. Устойчивость подкипающих аппаратов. М.: Энергоатомиздат, 1981.



Р и с. 4. Гипотетический пример динамики прохождения области колебательной неустойчивости: 1, 2 — границы существования колебательной неустойчивости; ↑, --- — появление пара в верхней части и во всем объеме необогреваемого участка соответственно

3. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Механизмы неустойчивых процессов в тепловой и ядерной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1981.
4. Мишина А.П., Проскуряков И.В. Высшая алгебра. М.: Наука, 1965.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1984.
6. Бутенин Н.В., Неймарк Ю.И., Фужаев Н.А. Введение в теорию нелинейных колебаний. М.: Наука, 1987.
7. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. Учеб. пособие. М.: Наука, 1984.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А., Каменевская Е.А. Термодинамические производные для воды и водяного пара. М.: Энергия, 1977.

Поступила в Редакцию 21.07.08

УДК 621.039.548

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НЕГЕРМЕТИЧНЫХ ТВЭЛОВ В ТВС ВВЭР И РБМК И РЕЗУЛЬТАТЫ ЕГО АПРОБАЦИИ

Павлов С.В. (ГНЦ НИИАР, г. Димитровград)

Повышение безопасности и экономичности АЭС требует непрерывного совершенствования конструкции и технологии изготовления ТВС и твэлов, а также оптимизации режимов их эксплуатации. Для этого, в частности, необходимо располагать статистически значимыми данными о состоянии ТВС и твэлов после эксплуатации в

реакторе. Такие данные получают в результате послереакторных исследований ТВС, которые в нашей стране проводятся, в основном, в защитных камерах научно-исследовательских центров. За рубежом основной объем исследований ТВС и твэлов с использованием неразрушающих ме-