

данных показал, что АТЭЦ эффективны по сравнению с раздельной схемой производства тепла в котельных на органическом топливе и электроэнергии на АЭС лишь при концентрации тепловых нагрузок не ниже 1500 Гкал/ч. Однако по мере повышения стоимости органического топлива для котельных эффективность АТЭЦ возрастает и при стоимости топлива 40 руб./т усл. т. АТЭЦ эффективны уже в узлах с нагрузкой порядка 1000 Гкал/ч.

Сравнение АТЭЦ с раздельным производством электроэнергии на АЭС и тепла в атомных котельных показало, что если стоимость атомных котельных не превышает 100 тыс. руб./Гкал, то комбинированная схема производства тепла и электроэнергии на АТЭЦ эффективнее, чем раздельное производство тепла и электричества в узлах с тепловой нагрузкой сверх 1500 Гкал/ч. В узлах с более низкой концентрацией тепловых нагрузок предпочтительнее сооружение котельных.

Если стоимость атомных котельных превышает 100 тыс. руб./Гкал, то АТЭЦ эффективны уже в узлах с нагрузкой 1000 Гкал/ч. По мере возрастания стоимости урана эффективность АТЭЦ еще более увеличивается. В тех случаях, когда АЭС размещаются непосредственно в зонах теплового потребления, использование их для производства тепла бесспорно целесообразно.

удк 621.039.334

Устойчивость кипящего канала

Будников В. И., Косолапов С. В.

Кипящие каналы являются составной частью кипящих реакторов и парогенераторов. При расчетах их устойчивости широко используются частотные методы [1, 2]. В ряде задач устойчивость кипящего канала исследуется прямым расчетом на ЭВМ переходного процесса [3]. В настоящей работе предлагается методика расчета на ЭВМ устойчивости кипящего канала, которая является развитием способа, изложенного в работе [4]. Суть методики заключается в следующем. На основе математической модели кипящего канала на ЭВМ рассчитывается переходная функция, определяющая отклик в изменении перепада давления на канале при возмущении скорости теплоносителя на его входе. По этой функции находится передаточная, которая затем подставляется в характеристиче-

Экономическая эффективность АЭС и АТЭЦ и использование их в режиме регулирования в конечном счете предопределяется условиями развития всего топливно-энергетического комплекса. Изменение его до конца текущего века ожидается в направлении массового внедрения ядерной энергетики для производства электричества и тепла и перераспределения качественного газомазутного топлива в пользу неэнергетических потребителей. Это сопровождается существенным изменением замыкающих оценок на топливо и энергию, с учетом чего в данной работе сделаны технико-экономические сравнения и оценки.

Исследование по определению эффективности ядерной энергетики позволило выявить и сформулировать ряд устойчивых решений, в частности установить рациональные масштабы развития АЭС во времени и показать целесообразность возложения на базисные АЭС функции регулирования электрического графика нагрузки. Кроме того, полученные зависимости эффективности АЭС от исходных технико-экономических показателей сравниваемых вариантов позволяют своевременно пересматривать и корректировать решения по мере уточнения исходных данных.

Поступила в Редакцию 15.III.78

ское уравнение. Расположение корней последнего анализируется методом D -разбиения [2].

Особенность методики — использование нелинейной математической модели и достаточно малых возмущений, при которых влияние нелинейности модели становится пренебрежимо малым. Это избавляет от линеаризации исходных уравнений и, что самое важное, позволяет по той же самой программе, которая используется для расчета переходной функции, рассчитывать переходные процессы при глубоких возмущениях.

Методика расчета устойчивости изложена на примере исследования кипящего канала с его подводной и отводящей необогреваемыми коммуникациями. Теплоноситель в канале движется за счет разности давлений в раздающем

(P_A) и сборном (P_B) групповых коллекторах. При математическом описании кипящего канала энтальпия теплоносителя на его входе ($i_{вх}$), а также перепад давления между коллекторами ($P_A - P_B$) постоянны. Для исключения из рассмотрения акустических процессов воспользуемся интегральной формой уравнения сохранения количества движения [3]. Тогда после линеаризации и преобразования по Лапласу это уравнение можно записать в виде

$$2\Delta P_{вх}^* + Tp + G(p) = 0, \quad (1)$$

где $G(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} F(t) dt$; $F(t)$ — переходная

функция, определяющая приращение суммарного перепада давления на кипящем канале и отводящей коммуникации (ΔP_0) при единичном ступенчатом возмущении скорости теплоносителя на входе канала; p — параметр преобразования Лапласа; $\Delta P_{вх}^*$ — суммарный перепад давления на подводящей коммуникации и находящихся на ней запорно-регулирующих клапанах; звездочкой обозначены переменные в стационарном режиме. Параметр T характеризует инерцию теплоносителя и равен $T = \left(\frac{Lu_{вх}}{v'}\right)^*$. Здесь L — длина подводящей коммуникации; $u_{вх}$ — скорость теплоносителя на входе канала; v' — удельный объем воды.

Для нахождения функции $F(t)$ решим уравнение сохранения вещества и энергии (для теплоносителя) совместно с уравнениями, описывающими теплопровод к теплоносителю. Воспользуемся следующими граничными и начальными условиями: $P_A - P_B = \text{const}$; $i_{вх} = \text{const}$; $u_{вх} = u_{вх}^* + c \cdot 1(t)$. Остановимся несколько подробнее на выборе возмущения (c) по скорости. При нахождении переходной функции по нелинейной модели возмущение по начальным условиям должно выбираться достаточно малым (обычно $< 10\%$). Область линейности модели можно установить, проводя серию контрольных расчетов на ЭВМ при различном возмущении. Поэтому на практике функцию $F(t)$ можно найти так: вначале рассчитывается $\Delta P_0(t)$ для такого возмущения по $u_{вх}$, при котором модель еще находится в области линейности. Затем полученное значение перепада давления пересчитывается на 100%-ное возмущение по скорости. Так, например, если функция $\Delta P_0(t)$ находилась при $c = 0,01 u_{вх}^*$, то $F(t) = 100 (\Delta P_0(t) - \Delta P_0^*)$.

Представляя полученную функцию $F(t)$ в виде суммы кусочно-линейных функций, $G(p)$ можно записать в виде

$$G(p) = a_0 + \sum_{l=1}^N (a_l - a_{l-1}) \frac{1 - e^{-\tau p}}{\tau p} e^{-(l-1)\tau p}, \quad (2)$$

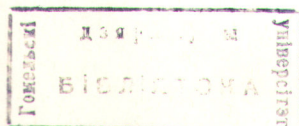
где τ — интервал разбиения временной оси; N — число интервалов разбиения; a_l — значение функции $F(t)$ в l -м узле аппроксимации. Подставим (2) в (1). Заметим, что параметры $\Delta P_{вх}^*$ и T в уравнение (1) входят линейно. В связи с этим расположение корней уравнения (1) удобно исследовать методом D -разбиения по параметрам $\Delta P_{вх}^*$ и T . Для решения вопроса о принадлежности претендента на область устойчивости самой области устойчивости воспользуемся достаточным критерием устойчивости, полученным в [4]. Из этого критерия следует, что если $F(t)$ устанавливается за конечное время t_0 и является функцией ограниченного изменения, то при $T = 0$ и выполнении неравенства

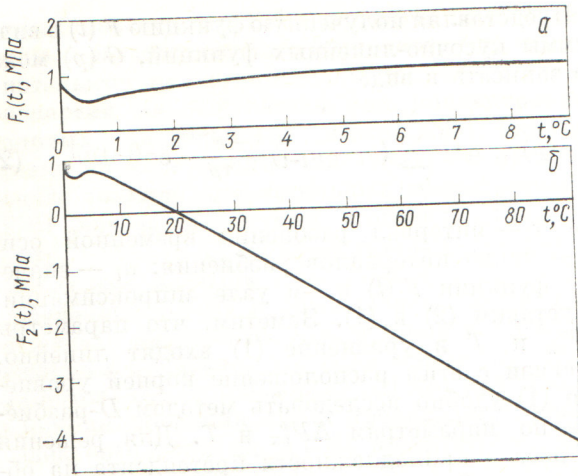
$$2\Delta P_{вх}^* > \int_0^{t_0} |dF(t)| \quad (3)$$

все корни характеристического уравнения (1) располагаются лишь в левой полуплоскости комплексного параметра p^* . Отметим, что методика применима для исследования устойчивости не только изолированного кипящего канала, но и замкнутого контура циркуляции, содержащего кипящий канал. В этом случае при нахождении функции $F(t)$ изменяются граничные условия: перепад давления ($P_A - P_B$) становится переменным и определяется напором циркулятора, а энтальпия $i_{вх}$ находится из уравнения тепло- и массопереносов на подводящей коммуникации.

Пример. В качестве иллюстрации методики приведем результаты расчета на ЭВМ устойчивости нормального режима среднего технологического канала (ТК) РБМК-1000 [5]. На рис. 1, а изображена переходная функция $F_1(t)$, полученная при условии, что $i_{вх} = \text{const}$ и давление в групповых раздающих коллекторах и сепараторе P_c постоянно. Расчет $F_1(t)$ проводился

* Действительно, $G(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} dF(t)$ и, следовательно, $\text{Re } G(p) \leq \int_0^{\infty} |dF(t)|$. С учетом последнего из уравнения (1) получаем (3).





Р и с. 1. Характерный вид переходных функций $F_1(t)$ и $F_2(t)$

в предположении постоянства во времени теплового потока в теплоноситель на основе уравнений интегральной модели сохранения количества движения [3]. Исходные уравнения записывали в виде [6]:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = Q \frac{\partial v}{\partial i} - \frac{u}{s} \frac{ds}{dz} + \left(\frac{1}{v} \frac{\partial v}{\partial P_c} + A \frac{\partial v}{\partial i} \right) \frac{dP_c}{dt} - \frac{1}{s} \frac{\partial v}{\partial i} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{su(k-1)}{v} \left(\frac{i-i'}{1+k \frac{v-v'}{v''-v}} \right) \right]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial i}{\partial t} + u \frac{\partial i}{\partial z} = Qv + Av \frac{dP_c}{dt} - \frac{v}{s} \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{su(k-1)}{v} \left(\frac{i-i'}{1+k \frac{v-v'}{v''-v}} \right) \right]; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \int_0^H s \frac{u}{v} dz + s \frac{u^2}{v} (1+\chi) \Big|_0^H + \int_0^H \lambda \frac{u^2}{v} (1+\chi) dz + \int_0^H g_z \frac{s}{v} dz = \int_0^H s \frac{\partial P}{\partial z} dz; \quad (6)$$

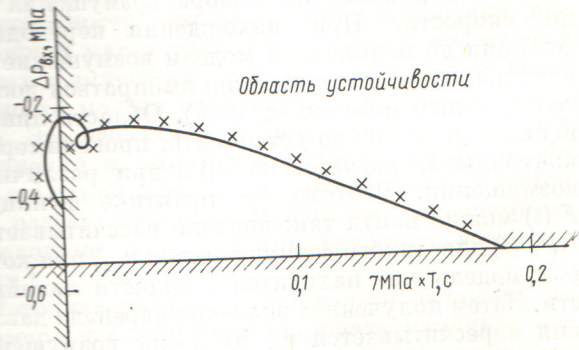
$$v = v(i, P_c), \quad (7)$$

$$\text{где } \chi = \frac{(k-1)^2 (v''-v)(v-v')}{[v''-v+k(v-v')]^2}; \quad \lambda = \frac{\xi \Pi_{\Gamma}}{8};$$

i, v, u — соответственно энтальпия, удельный объем и скорость теплоносителя; Q — тепловой поток в единицу объема теплоносителя; i' — энтальпия воды на линии насыщения; v'' — удельный объем насыщенного пара; k — коэффициент проскальзывания паровой фазы относительно жидкой; ξ — коэффициент гидравли-

ческого сопротивления; H — длина контура циркуляции теплоносителя от раздающего коллектора до сепаратора; s — площадь поперечного сечения; Π_{Γ} — гидравлический периметр; A — тепловой эквивалент механической работы; g_z — проекция ускорения силы тяжести; z — продольная координата; t — время.

Система (4)–(7) дана для равновесного потока и описывает нестационарные процессы тепло- и массопереноса на всех участках контура, включая участки с кипением теплоносителя. Для решения уравнения (4)–(6) записывались в конечных разностях. При этом как отводящая коммуникация, так и ТК разбивался по пространственной координате на 12 участков, а подводящая коммуникация — на 30. Аппроксимирующие уравнения в обыкновенных производных решались методом Рунге — Кутты в модификации Мерсона. При расчете переходной функции $F_1(t)$ возмущение по скорости на входе ТК равно $\epsilon = 0,01u_{\text{вх}}^*$. При нахождении $F_1(t)$ уравнение (6) из расчетов исключается. На рис. 2 изображено D -разбиение уравнения (1), в котором передаточная функция $G(p)$ находилась по $F_1(t)$, приведенной на рис. 1, а. При аппроксимации $F_1(t)$ в уравнении (2) принималось, что $N = 70, \tau = 0,1$ с. Поскольку $F_1(t)$ является функцией конечного изменения (см. рис. 1, а), то в силу неравенства (3) претендент на область устойчивости принадлежит ей же. Из рис. 2 следует, что в номинальном режиме средний технологический канал РБМК-1000 асимптотически устойчив в малом и обладает запасом устойчивости по $\Delta P_{\text{вх}} > 0,3$ МПа. Последнее позволяет утверждать, что в номинальном режиме при условии постоянства во времени теплового потока в теплоноситель так называемая теплогидравлическая не-



Р и с. 2. D -разбиение плоскости параметров $(T, \Delta P_{\text{вх}})$ в случае разомкнутой обратной связи реактивность — мощность

устойчивость среднего технологического канала РБМК-1000 исключена.

Однако следует иметь в виду, что в реакторах типа РБМК теплоподвод к теплоносителю является нестационарным и определяется сложным характером обратных связей, обусловленных эффектами реактивности по паросодержанию, горючему и замедлителю. При положительном паровом эффекте реактивности распределение мощности в РБМК-1000 может оказаться неустойчивым [7]. В этом случае переходная функция $F(t)$, рассчитанная с учетом эффектов реактивности, может иметь либо неограниченное полное изменение, либо при «уходе» от состояния равновесия отклонения переменных выйдут из области линейности математической модели. Последнее можно видеть на примере функции $F_2(t)$, приведенной на рис. 1, б. Эта функция, как и $F_1(t)$, рассчитывалась для среднего канала РБМК-1000 на основе системы (4)–(7), дополненной «точечными» уравнениями кинетики и уравнениями, описывающими процесс передачи тепла от горючего к теплоносителю и замедлителю. Расчет $F_2(t)$ проводился при «выключенном» регуляторе общей мощности. Паровой эффект реактивности принимался равным 3β , а коэффициенты реактивности по горючему и графиту выбирались соответственно равными $-1,6 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-51}/^\circ\text{C}$.

Характер поведения функции $F_2(t)$ указывает на то, что «разомкнутый» по скорости на входе реактора средний ТК экспоненциально неустойчив, а механизм неустойчивости РБМК-1000 имеет нейтронно-физическую природу.

В заключение отметим, что условием применимости предлагаемой методики является устойчивость разомкнутой системы, для которой находится переходная функция $F(t)$. В тех случаях, когда разомкнутая система неустойчива, т. е. функция $F(t)$ имеет неограниченное полное изменение или переменные при расчете

$F(t)$ выходят из области линейности, для исследования устойчивости кипящего канала следует провести размыкание обратной связи по реактивности и рассчитать переходную функцию $E(t)$. Последняя находится по тем же уравнениям (4)–(7) и той же самой программе, что и функция $F(t)$. Разница состоит лишь в месте размыкания системы уравнений и в переменной, по которой наносится ступенчатое возмущение. При расчете $E(t)$ скорость на входе ТК* определяется по уравнению (6). Ступенчатое возмущение целесообразно подавать по тепловому потоку в теплоноситель, а в качестве выходной переменной рассматривать среднее паросодержание по высоте активной зоны. В этом случае удобно выделить область устойчивости в плоскости коэффициентов реактивности по горючему и паросодержанию. Вывод соответствующего характеристического уравнения и техника построения областей устойчивости приведены в работе [7].

Авторы благодарят Е. Ф. Сабаева за полезное обсуждение работы.

Поступила в Редакцию 22.VIII.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов И. И., Герлига В. А. Устойчивость кипящих аппаратов. М., Атомиздат, 1969.
2. Горяченко В. Д. Методы теории устойчивости в динамике ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1971.
3. Мейер Д., Роуз П. «Теплопередача» (Труды американского общества инженеров-механиков), 1963, сер. С, т. 85, № 1, с. 3.
4. Будников В. И., Сабаев Е. Ф. В кн.: Вопросы теории тепло- и массообмена. Под ред. Т. Л. Перельмана. Минск, ИТМО АН БССР, 1970, с. 244.
5. Петросьянц А. М. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 4, с. 333.
6. Будников В. И., Сабаев Е. Ф. «Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ядерных энергетических установок», 1976, вып. 1(9), с. 65.
7. Будников В. И., Сабаев Е. Ф. Там же, 1975 вып. 2(8), с. 59.

* Напомним, что при расчете $F(t)$ уравнение (6) не используется.

УДК 539.172.4

Состояние экспериментальных данных по альфа ^{239}Pu

КОНОНОВ В. Н., ПОЛЕТАЕВ Е. Д.

Эксперименты по измерению α (отношение сечений радиационного захвата и деления) являются основным источником информации о сечении захвата быстрых нейтронов в ^{239}Pu ,

которое относится к числу ключевых ядерно-физических констант, определяющих важнейшие реакторно-физические и технико-экономические характеристики быстрых реакторов-раз-