

Некоторые особенности автоколебательных режимов кипящего реактора

Б. В. КЕБАДЗЕ, В. И. ПЛЮТИНСКИЙ

УДК 621.039.514:621.039.524.44

К настоящему времени опубликовано много работ по определению границ устойчивости кипящего реактора в линейном приближении. В то же время для реактора, склонного к резонансной неустойчивости, значительный интерес представляют процессы, происходящие вблизи границы устойчивости [1, 2]. Цель настоящей работы — выявление особенностей поведения кипящего реактора с естественной циркуляцией теплоносителя в автоколебательном режиме экспериментальным и расчетным путем.

Одной из задач экспериментов, проведенных на реакторе ВК-50 [3], было изучение характера возникновения и развития автоколебаний, а также зависимости их амплитуды и частоты от основных параметров реактора (мощности, давления теплоносителя и т. п.).

Для регистрации колебаний потока нейтронов кроме рабочих самописцев мощности применялись быстродействующие самописцы (ЭПП-09М с пробегом шкалы в 1 сек, гальванометр «Рapidграф» с полосой частот 0—15 гц) с дополнительными ионизационными камерами. Для контроля за средней мощностью сигнал, пропорциональный току ионизационной камеры, подавался на фильтр с постоянной времени 10 сек и затем на одну из дорожек самописца. Параллельно фиксировались также изменения давления теплоносителя в реакторе. По показаниям многоточечного самописца велось наблюдение за температурой теплоносителя на опускном участке. В процессе эксперимента, как и в режиме эксплуатации, регулятор мощности не использовался. Регулятор давления перед турбиной не включался.

В исследованных режимах оказалось невозможным добиться стационарного режима со значительной амплитудой колебаний. На рис. 1 показан характер автоколебательного режима. На верхней части рисунка представлены верхняя и нижняя огибающие колебаний потока нейтронов. Исходное состояние реактора соответствует тепловой мощности $N_T \approx 103 \text{ Мвт}$ и давлению теплоносителя $p \approx 39 \text{ ата}$. В момент времени $t = 1,5 \text{ мин}$ вводится положительная реактивность; одновременно с этим приоткрывается паровой клапан на выходе из реактора. По прошествии некоторого времени, в течение которого происходит спад

давления, начинается рост амплитуды колебаний потока нейтронов. Достигнув максимальной величины, колебания затухают, сохраняя в дальнейшем (при невмешательстве оператора) циклический характер с периодом $\sim 7 \text{ мин}$. Огибающая автоколебаний строилась путем усреднения максимальных и минимальных показаний самописца по 10 периодам «быстрых» колебаний. Частота быстрых колебаний, которая определяется усреднением по 20 периодам, изменяется в небольших пределах: 0,67—0,70 гц. Циклические изменения амплитуды колебаний потока нейтронов сопровождаются колебаниями давления теплоносителя с тем же периодом и некоторым отставанием по фазе, а также изменениями средней мощности реактора и температуры теплоносителя на опускном участке.

При введении реактора в режим автоколебаний и попытках стабилизировать его выяснилось, что увеличение средней мощности реактора на 3—4 Мвт путем быстрого перемещения компенсаторов само по себе не приводит к сколько-нибудь заметному росту амплитуды колебаний, а в некоторых режимах наблюдается даже снижение амплитуды. Только при последующем изменении давления теплоносителя либо при увеличении оператором расхода питательной воды для поддержания уровня воды в реакторе амплитуда колебаний существенно возрастает. На рис. 2 представлено поведение огибающих колебаний потока нейтронов A и средней мощности $N_{ср}$ в переходном режиме, вызванном повышением давления в связи с прикрытием парового клапана на выходе из

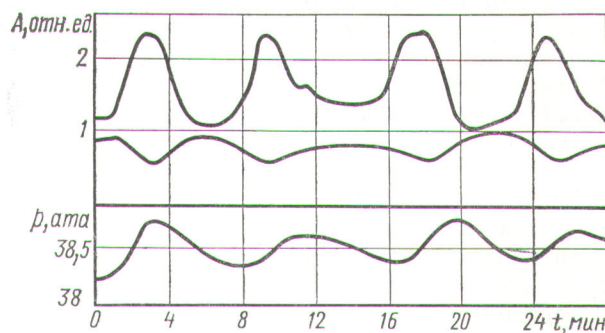
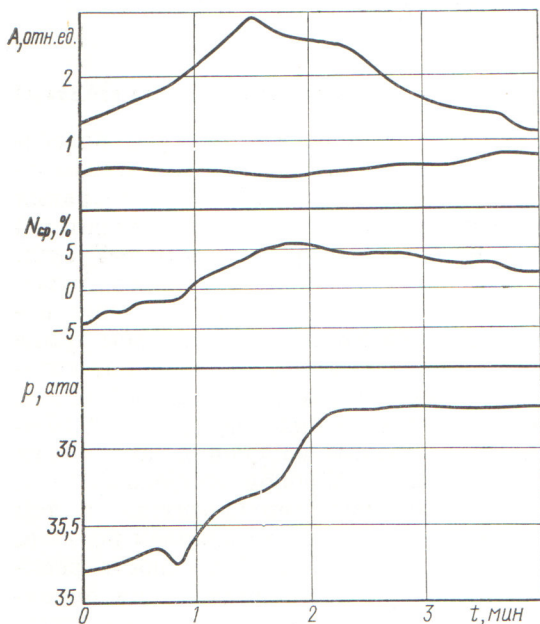


Рис. 1. Циклический характер автоколебательного режима.



Р и с. 2. Изменение амплитуды колебаний некоторых параметров при возмущении по давлению.

реактора. Амплитуда колебаний потока нейтронов первоначально растет с ростом давления и средней мощности реактора, а затем падает до величины, несколько меньшей исходной.

Проведенные эксперименты показывают сложное динамическое взаимодействие параметров реактора (средней мощности, давления теплоносителя, его энтальпии на входе в активную зону) и быстрых автоколебаний; в частности, появление последних сопровождается одновременным возникновением «медленных» колебаний параметров. Для объяснения наблюдаемых явлений были, во-первых, выполнены расчеты амплитуды быстрых колебаний в зависимости от указанных параметров и, во-вторых, исследована устойчивость параметров в области низких частот с учетом изменения амплитуды быстрых колебаний и сопутствующих им изменений постоянной составляющей реактивности, которые приводят к сдвигу средней мощности.

Расчет амплитуд колебаний проводился методом гармонического баланса. Уравнения обратной связи по паросодержанию и температуре горючего полагались линейными. Для определения амплитуд колебаний использовалась передаточная функция обратной связи, найденная из расчета динамического мощност-

ного коэффициента реактивности на основе теории возмущений с учетом пространственного (по высоте) распределения параметров. Для получения приращения реактивности рассматривалось одnogрупповое модифицированное уравнение, определяющее распределение потока нейтронов. Применение теории возмущений к этому уравнению позволило получить частотно-независимое выражение для реактивности через приращения теплофизических параметров активной зоны:

$$\delta\rho(s) = \int_0^H \kappa(z) \Phi_T^2(z) \delta\theta_{бл}(s, z) dz + \int_0^H L(z) \Phi_T^2(z) \delta\gamma_{см}(s, z) dz, \quad (1)$$

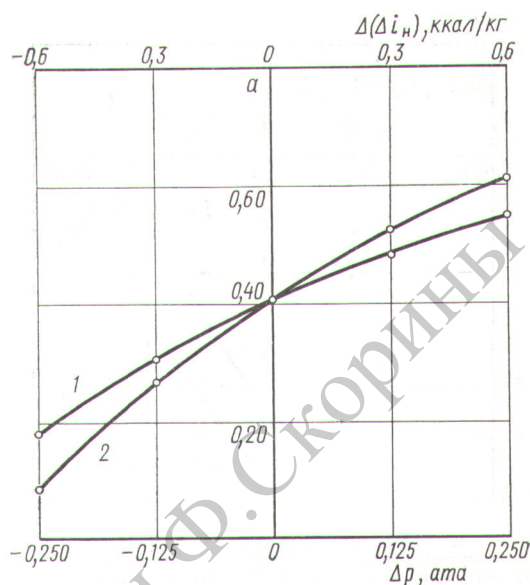
где Φ_T — поток тепловых нейтронов; z — пространственная координата; s — параметр преобразования Лапласа; $\delta\gamma_{см}(s, z)$ — приращение плотности паро-водяной смеси; $\delta\theta_{бл}(s, z)$ — приращение температуры горючего блока; $\kappa(z)$, $L(z)$ — некоторые ядернофизические параметры активной зоны, получаемые через усредненные по пространственно-энергетическим переменным двухгрупповые константы. Для определения величин $\delta\gamma_{см}(s, z)$, $\delta\theta_{бл}(s, z)$ исходными являются уравнения теплопроводности для трехслойного цилиндрического твэла и уравнения сохранения энергии и массы для обогреваемого канала с соответствующими начальными и граничными условиями. При этом в нестационарном уравнении для теплоносителя межфазовое проскальзывание пара не учитывается. Путем перехода к уравнениям для приращений, линеаризации и преобразования по Лапласу при нулевых начальных и граничных условиях получается передаточная функция от мощности реактора к параметрам $\delta\gamma_{см}$, $\delta\theta_{бл}$. С использованием соотношения (1) выводится передаточная функция обратной связи реактора, мнимая и действительная части которой аппроксимируются для дальнейших расчетов полиномами второго порядка.

Периодические решения уравнения кинетики были найдены методом последовательных приближений [1]. При этом связь между амплитудами гармоник реактивности a_k и мощности A_k выражается соотношением

$$W \mathbf{n}^l = \rho + W_p \mathbf{n}^{l-1}, \quad (2)$$

где ρ , \mathbf{n}^l — векторы, составленные из коэффициентов a и A_k ; W_p — матрица с элементами

$w_{ij} = a_{j-i}$; W — диагональная матрица с элементами $w(ki\omega)$, соответствующими обратным величинам амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) реактора нулевой мощности; l — номер приближения. Расчет амплитуд колебаний и постоянной составляющей реактивности a_0 проводился на ЭВМ. Ввиду сильного затухания высших гармоник в цепи обратной связи использовалась гипотеза фильтра. Такая методика дает хорошую сходимость для значений амплитуды первой гармоники реактивности, меньших $0,7\beta$, что соответствует амплитуде колебаний первой гармоники мощности, равной $\sim 60\%$ среднего уровня мощности. Некоторые результаты расчетов амплитуды колебаний при вариации отдельных параметров в окрестности режима с $N_T = 100 \text{ Мвт}$, $p = 35 \text{ ата}$ и при недогреве теплоносителя на входе в активную зону $\Delta i_H = 7,8 \text{ ккал/кг}$ приведены на рис. 3. Изменение в широких пределах амплитуды колебаний при незначительных вариациях давления и недогрева до энтальпии насыщения теплоносителя на входе в активную зону находится в согласии с экспериментом. Увеличение амплитуды колебаний реактивности с ростом недогрева хорошо согласуется с наблюдаемым на опыте ухудшением стабильности реактора при увеличении недогрева. Расчеты подтверждают также слабую зависимость амплитуды колебаний от средней мощности при неизменном давлении и недогреве теплоносителя ($\pm 7-8\%$ при изменении мощности на $\pm 5\%$). Практически при проведении экспериментов невозможно на длительное время изменить только один из параметров реактора. Так, в установившемся режиме увеличение мощности реактора из-за слабой зависимости расхода теплоносителя от мощности сопровождается ростом недогрева, что и приводит к отмечаемому в экспериментах и расчетах ухудшению стабильности и увеличению амплитуды колебаний [3]. Аналогично повышение давления теплоносителя при постоянной его энтальпии на входе в активную зону сопровождается возрастанием недогрева, что дестабилизирует реактор и увеличивает амплитуду колебаний. Однако по мере распространения тепловой волны по опускному участку и подреакторному объему происходит возвращение недогрева практически к прежнему значению и уменьшение амплитуды колебаний (см. рис. 2). Поскольку установившиеся режимы с различным давлением незначительно отличаются по недогреву, повышение давления в конечном итоге стабилизирует реактор [3].



Р и с. 3. Зависимость амплитуды первой гармоники реактивности a от давления теплоносителя (1) и его недогрева на входе в реактор (2).

Изменение амплитуды быстрых колебаний при вариации параметров реактора оказывает влияние на низкочастотные процессы вследствие смещения средней мощности и последующего изменения тепловых параметров. С целью уточнения временных (частотных) взаимосвязей параметров и объяснения, в частности, медленных циклических изменений амплитуды колебаний было проведено рассмотрение низкочастотной динамики реактора. В рамках упрощенной модели рассматривались процессы генерации пара на подъемном участке и конденсации пара на опускном участке, динамика давления в реакторе и перед турбиной и распространение теплового возмущения в опускном участке и подреакторном объеме при постоянном расходе циркуляции [4]. Активная зона реактора считалась безынерционным звеном, так как постоянные времена процессов здесь существенно меньше времен, связанных с изменением давления и энтальпии теплоносителя в подреакторном объеме. Активная зона характеризуется коэффициентами реактивности по мощности, энтальпии теплоносителя на входе и давлению, получаемыми из статических расчетов реактора по теории возмущений. Вклад автоколебаний учитывается путем изменения постоянной составляющей реактивности, соответствующей изменению амплитуды колебаний при вариациях параметров

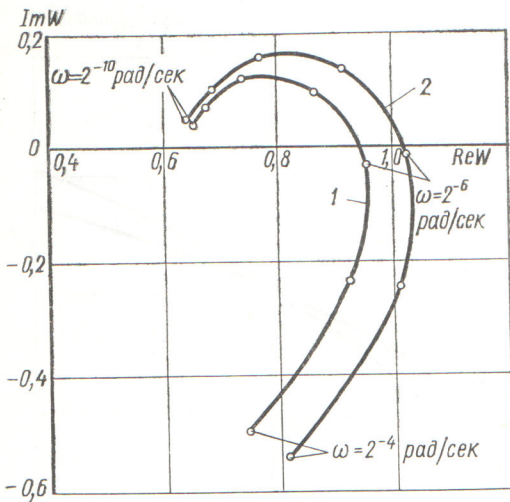


Рис. 4. Амплитудно-фазовая характеристика разомкнутой системы медленно меняющихся параметров без учета (1) и с учетом (2) автоколебаний.

реактора. Учитывается также изменение постоянной составляющей реактивности вследствие нелинейности статической зависимости реактивности от мощности. Влияние автоколебаний можно оценить путем сопоставления коэффициентов реактивности по давлению K_p и недогреву теплоносителя $K\Delta i_n$ без учета автоколебаний

$$K_{\Delta i_n} = -0,007 \text{ (ккал/кг)}^{-1}; \quad K_p = 0,016 \text{ атм}^{-1}$$

и с учетом автоколебаний

$$K_{\Delta i_n}^A = -0,008 \text{ (ккал/кг)}^{-1}; \quad K_p^A = 0,017 \text{ атм}^{-1}.$$

Линеаризованная и преобразованная по Лапласу система уравнений для приращения параметров представлялась в виде направленного графа [5]. Полученная по данному графу АФХ разомкнутой системы рассчитывалась на ЭВМ. АФХ разомкнутой системы без учета и с учетом автоколебаний показаны на рис. 4. Несмотря на то что суммарный эффект изменения давления и энтальпии теплоносителя на входе в активную зону положителен, реактор статически устойчив в линейном приближении, так как коэффициент усиления разомкнутой системы на нулевой частоте меньше единицы. Система имеет резонанс при $\omega \approx 2^{-6} \text{ рад/сек}$, который определяется динамическим взаимодействием давления в корпусе реактора и энтальпии на входе в активную зону; для изменения энтальпии, обусловленного в основном величиной $\frac{\partial i'}{\partial p}$, характерно некоторое запаздывание по отношению к изменению давления.

Кривая 2 на рис. 4 отражает дестабилизирующее влияние автоколебаний на поведение медленно меняющихся параметров системы: АФХ пересекает действительную ось за точкой (1; 0), что указывает на неустойчивость в линейном приближении системы с учетом быстрых колебаний. Период, соответствующий резонансной частоте ($T = 6,8 \text{ мин}$), близок к наблюдаемому на опыте периоду изменения амплитуды колебаний ($T = 7 \text{ мин}$). Как видно из рис. 4, влияние автоколебаний на характеристику разомкнутой системы невелико, однако то обстоятельство, что появление медленных колебаний в экспериментах всегда сопровождается быстрыми автоколебаниями, подтверждает их дестабилизирующее влияние на устойчивость системы медленно меняющихся параметров.

На основании изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Заключение о предполагаемом изменении амплитуды колебаний при изменениях мощности реактора и давления теплоносителя, сделанные на основе исследования стационарных режимов, нельзя распространять на переходные процессы, где эффект может быть противоположным.

2. Эксперименты и расчеты амплитуд колебаний указывают на «мягкий» режим возбуждения колебаний. Изменению амплитуды колебаний от уровня шумов до величин, препятствующих нормальной эксплуатации реактора, соответствует малое изменение теплофизических параметров.

3. Автоколебания оказывают дестабилизирующее воздействие на низкочастотные характеристики реактора, что в некоторых случаях приводит к медленным циклическим изменениям амплитуды колебаний и теплофизических параметров реактора.

Авторы признательны В. А. Афанасьеву за содействие в организации и проведении экспериментов, а также Л. А. Адамовскому и В. А. Жуковой за помощь в расчетах.

Поступила в Редакцию 10/VII 1970 г.
В окончательной редакции 30/XII 1970 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. З. Торлин. «Атомная энергия», 18, 463 (1965).
2. В. П. Горбунов, А. В. Крянев, С. Б. Шихов. Там же, 27, 48 (1969).
3. В. А. Афанасьев и др. Там же, 24, 363 (1968).
4. А. Я. Крамеров, Я. В. Швелев. Инженерные расчеты ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1965.
5. Л. Робиншо, М. Буавер, Ж. Робер. Направленные графы и их приложение к электрическим цепям и машинам. М., «Энергия», 1964.