

# ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СОВРЕМЕННЫХ ПРОЕКТАХ СУДОВЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

*Кресов Д.Г.*

АО «ОКБМ Африкантов»,  
603074, г. Нижний Новгород, Бурнаковский проезд, 15



Новое поколение судовых РУ и РУ для АСММ широкого спектра назначения наряду с повышенными требованиями к безопасности объединяют высокие заданные ресурсные показатели. В определенных условиях расчетные переходные процессы могут сопровождаться длительными знакопеременными отклонениями параметров РУ от заданных значений, что свидетельствует о недостаточных параметрических запасах до границы устойчивости. Одним из провоцирующих факторов возникающего при этом дополнительного термо- и бароциклирования оборудования РУ служит подключение вынесенной системы компенсации давления к горячим участкам первого контура. При этом подмешивание относительно холодного теплоносителя в основной контур циркуляции на этапе снижения давления усиливает амплитуду отрицательной полуволны колебаний температуры в реакторе.

С целью накопления физических представлений о таком параметрическом воздействии в работе рассматриваются две упрощенные модели реактора, существенно отличающиеся местом подключения компенсатора давления. Результаты анализа линеаризованных моделей позволяют сделать вывод о снижении области устойчивости системы при смешении теплоносителей непосредственно на выходе из активной зоны и, наоборот, о демпфировании перерегулирований в случае смешения теплоносителей на ее входе. При этом выявлен ряд параметров, существенно влияющих на границу устойчивости.

Представлены расчеты одного из переходных процессов по нелинейной модели, подтверждающие полученные теоретические выводы и иллюстрирующие амплитуды возмущений ряда параметров РУ, полученные для одного из проектов этапа эскизных проработок.

По итогам исследования отмечены факторы, способствующие стабилизации реакторной системы обратных связей.

**Ключевые слова:** кинетика, фазовое запаздывание, неустойчивость, теплогидравлическая инерционность.

**Для цитирования:** Кресов Д.Г. Влияние параметрического эффекта на устойчивость переходных процессов в современных проектах судовых реакторных установок. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 3. – С. 32–43. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.03>

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения заданного ресурса оборудования современных РУ, разрабатываемых на базе судовых технологий, используются различные схемно-конструктивные и алгоритмические меры, снижающие в условиях жестких маневренных режимов – при скорости изменения заданной мощности до 1%/с – и заявленных сроках службы РУ до 60-ти лет [1] амплитуду и продолжительность знакопеременных отклонений определяющих параметров от заданных значений в переходных процессах. Эти меры основываются на знании физических механизмов, ответственных за появление и усиление колебаний параметров. Ряд таких механизмов обзорно отмечен в [2]. Одним из усиливающих колебаний факторов может являться периодическое поступление в реактор воды из вынесенной газовой системы компенсации давления (КД). Суть механизма заключается в подмешивании относительно холодного теплоносителя (~40°C) в основной контур циркуляции на этапе снижения давления, что может усиливать амплитуду отрицательной полуволны колебания температуры в реакторе. В зависимости от места подключения КД меняются эффективность и знак явления. Наиболее негативным образом явление проявляется при синфазном характере колебаний давления в реакторе и температуры теплоносителя в точке смешения теплоносителей. В противофазном случае параметрическое воздействие будет выполнять демпфирующую роль. Интерес к механизму возник в связи с переносом места подключения КД с «холодных» участков реактора (в РУ КЛТ-40, КЛТ-40М и ОК-900) на «горячие» (в РУ КЛТ-40С и типа РИТМ) с целью повышения безопасности в авариях типа LOCA и с началом проектирования РУ с активными зонами увеличенной высоты [3, 4], что при определенных условиях может приводить к усилению перерегулирований параметров из-за появляющейся возможности существенной локализации аксиального поля энерговыделений. Дополнительным провоцирующим фактором возникающего термо- и бароциклирования оборудования РУ в новых проектах являются возросшие коэффициенты реактивности по теплоносителю, увеличивающие коэффициент усиления цепи отрицательной обратной связи.

Механизм параметрического воздействия на колебания общереакторных параметров представляется недостаточно изученным. Традиционно в дополнение к расчетным исследованиям по сложным моделям для получения наиболее общих решений и накопления физических представлений привлекаются простые модели, ограниченные учетом определяющих характер изучаемых процессов факторов, пригодных для аналитического исследования.

## МОДЕЛЬ ДИНАМИКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрим две упрощенные модели реактора, отличающиеся местом подключения системы КД, с описанием контура циркуляции двумя теплогидравлическими звеньями и в представлении одногрупповой нейтронной кинетики в приближении мгновенного скачка без внешних источников [5]. Постулируется идеальное смешение теплоносителей.

## Модель с подключением КД к выходу из активной зоны

$$\left. \begin{aligned}
 \rho n_0 - \beta n + l\lambda C &= 0, \\
 l \frac{dC}{dt} &= \beta n - l\lambda C, \\
 \rho &= \frac{1}{2} (\alpha_+ [\theta_{\text{ввых}} - \theta_{\text{ввых.0}}] + \alpha_- [\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{вх.0}}]), \\
 \theta_{\text{ср}} &= \frac{1}{2} (\theta_{\text{ввых}} + \theta_{\text{вх}}), \\
 m_1 c_p \frac{d\theta_{\text{ср}}}{dt} &= Qn + c_p G (\theta_{\text{вх}} - \theta_{\text{ввых}}), \\
 m_2 \frac{d\theta_{\text{вх}}}{dt} &= G (\theta_{\text{см}} - \theta_{\text{вх}}), \\
 \theta_{\text{см}} &= \frac{\theta_{\text{ввых}} G + \theta_{\text{КД}} G_{\text{КД}}}{G + G_{\text{КД}}} \Big|_{\theta_{\text{КД}} \rightarrow 0^\circ\text{C}} \approx \theta_{\text{ввых}} \left( 1 - \frac{G_{\text{КД}}}{G} \right), \\
 \frac{G_{\text{КД}}}{G} &= \left[ \frac{\theta_{\text{ввых}}}{\theta_{\text{ввых.0}}} \left( 0,28 \sin(\Omega t) - 0,49 + \frac{0,21}{\sin(\Omega t)} \right) \right] \mu
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $\rho$  – реактивность, отн.ед.;  $n_0$  – стационарный уровень мощности, отн.ед.;  $\beta$  – доля запаздывающих нейтронов, отн.ед.;  $n$  – мощность, отн.ед.;  $l$  – время жизни мгновенных нейтронов, с;  $\lambda$  – постоянная распада излучателей запаздывающих нейтронов,  $\text{с}^{-1}$ ;  $C$  – концентрация ядер излучателей запаздывающих нейтронов, отн.ед.;  $t$  – время, с;  $\alpha_+$  – температурный коэффициент реактивности по теплоносителю на выходе из активной зоны,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{ввых}}$  – температура теплоносителя на выходе из активной зоны,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{ввых.0}}$  – температура теплоносителя на выходе из активной зоны при работе на мощности  $n_0$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_-$  – температурный коэффициент реактивности по теплоносителю на входе в активную зону,  $1/^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{вх}}$  – температура теплоносителя на входе в активную зону,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{вх.0}}$  – температура теплоносителя на входе в активную зону при работе на мощности  $n_0$ ,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{ср}}$  – средняя температура теплоносителя в реакторе,  $^\circ\text{C}$ ;  $m_1$  – масса теплоносителя в активной зоне, кг;  $c_p$  – теплоемкость теплоносителя,  $\text{кДж}/(\text{кг}^\circ\text{C})$ ;  $Q$  – номинальная мощность реактора, кВт;  $G$  – расход теплоносителя через реактор,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $m_2$  – масса теплоносителя на участке первого контура от выхода до входа в активную зону, кг;  $\theta_{\text{см}}$  – среднесмешанная температура теплоносителя непосредственно после места подключения КД,  $^\circ\text{C}$ ;  $\theta_{\text{КД}}$  – температура теплоносителя в системе КД,  $^\circ\text{C}$ ;  $G_{\text{КД}}$  – расход теплоносителя, поступающего из КД,  $\text{кг}/\text{с}$ ;  $\Omega$  – частота колебаний общереакторных параметров,  $\text{с}^{-1}$ ;  $\mu$  – малый параметр ( $0 < \mu \ll 1$ ), отн.ед.

В последнем уравнении системы (1) множитель перед  $\mu$  имитирует расход теплоносителя, поступающего из системы КД. При этом полагается, что отклонение давления в первом контуре с хорошей степенью приближения сфазировано с динамикой отклонения выходной температуры. Так в условиях постоянства теплоотода от первого контура выходная температура рассматривается как первичный источник возмущений температур в первом контуре, формирующий знак отклонений давления. Последующее распространение фронта зонного возмущения по пассивным участкам контура, очевидно, только

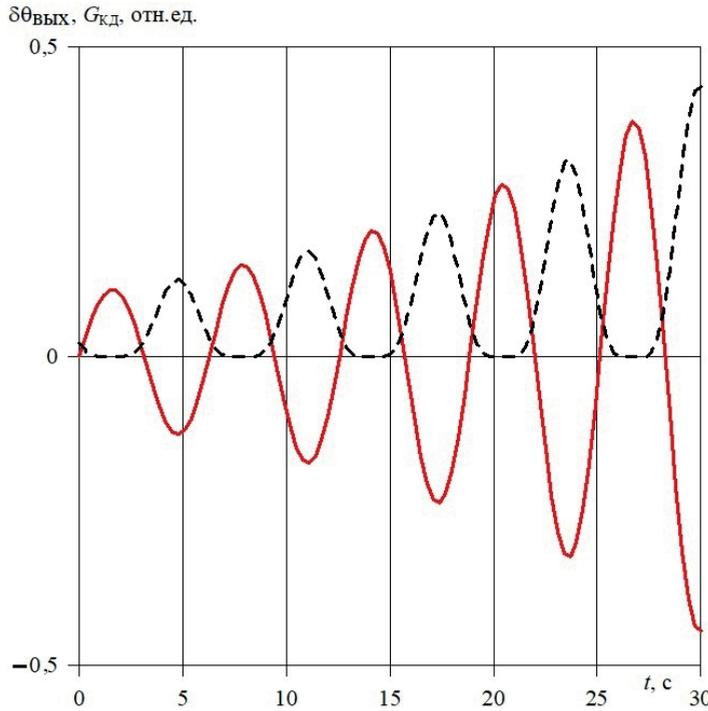


Рис. 1. Динамика модельного расхода теплоносителя из КД при  $\Omega = 1$  (пунктир) в условиях отклонений выходной температуры от стационарного значения по закону  $\delta\theta_{\text{вых}} = 0,1\exp(0,05t)\sin(t)$  (сплошная линия)

снижает амплитуду возмущения температуры, не корректируя фазу давления. Множитель подобран в виде гладкой функции (для удобства анализа) и учитывает то, что расход из системы КД противофазен отклонению давления. На рисунке 1 для иллюстрации качественной адекватности подобранной таким образом модели расхода представлен характер отслеживания обсуждаемым множителем примера развития колебательной неустойчивости температуры (и давления).

### Анализ модели

Система (1) в отклонениях переписывается в виде

$$\left. \begin{aligned} & \lambda^{-1} \left[ 2\beta\delta\dot{n} + n_0 (|\alpha_+| \delta\dot{\theta}_{\text{вых}} + |\alpha_-| \delta\dot{\theta}_{\text{вх}}) \right] + \\ & + n_0 (|\alpha_+| \delta\theta_{\text{вых}} + |\alpha_-| \delta\theta_{\text{вх}}) = 0, \\ & \frac{\tau_1}{2} (\delta\dot{\theta}_{\text{вых}} + \delta\dot{\theta}_{\text{вх}}) = \frac{Q}{c_p G} \delta n + \delta\theta_{\text{вх}} - \delta\theta_{\text{вых}}, \\ & \tau_2 \delta\dot{\theta}_{\text{вх}} = \delta\theta_{\text{вых}} \left( 1 - \mu \left[ 0,28 \sin(\Omega t) - 0,49 + \frac{0,21}{\sin(\Omega t)} \right] \right) - \delta\theta_{\text{вх}} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где  $\tau_1 = m_1/G$ ,  $\tau_2 = m_2/G$ , а точка над переменной означает дифференцирование по  $t$ .

Переменная  $\delta\theta_{\text{вх}}$  в последнем уравнении (2) может быть достаточно просто (пользуясь линейностью остальных уравнений) выражена через  $\delta\theta_{\text{вых}}$ . В результате получим уравнение третьего порядка относительно  $\delta\theta_{\text{вых}}$  с нелинейным комплексом слагаемых, умноженным на  $\mu$ . Предполагая воспользоваться известными методами возмущений для нахождения приближенных решений уравнений с малой нелинейной частью [6] (типа метода Ван-дер-Поля), можно заметить, что слагаемые вида  $\delta\theta_{\text{вых}} \sin(\Omega t)$  и  $\delta\theta_{\text{вых}}/\sin(\Omega t)$  не дадут вклада в решение первого приближения, и ими можно пренебречь. Тогда, исходя из того, что оставшаяся часть множителя при  $\mu$  в данном случае – константа, систему (2) можно представить линейным уравнением, характеристическое уравнение которого записывается в виде

$$\lambda^{-1}\tau_1\tau_2\rho^3 + \lambda^{-1}[2\tau_1 + \tau_2(2 + E_+)]\rho^2 + (E_+(\lambda^{-1} + \tau_2) + E_-\lambda^{-1})\rho + E_+ + E_- \approx \mu[\lambda^1(1 - 0.5E_-)\rho - 0.5E_-],$$

где  $E_+ = |\alpha_+|n_0Q/[c_pG\beta]$ ,  $E_- = |\alpha_-|n_0Q/[c_pG\beta]$ ,  $0,49 \approx 0,5$ .

Если положить  $\alpha_- = \alpha_+ = \alpha$ , то можно заметить, что выражения для  $E_{\pm}$  являются коэффициентами усиления цепи обратной связи так же, как в предельно упрощенной однотемпературной модели Якововича, Акзью, Шоткина [7]. Все параметры характеристического уравнения больше нуля, следовательно, здесь отсутствуют действительные положительные решения (правило знаков Декарта), но возможны комплексные решения с положительной реальной частью.

Условие устойчивости по критерию Рауса – Гурвица:

$$\lambda^{-1} > \frac{\tau_1\tau_2(E_- + 0,5\mu E_-) - \tau_2E_+[\tau_1 + \tau_2(2 + E_+)]}{[2\tau_1 + \tau_2(2 + E_+)] [E_+ + E_- - \mu(1 - 0.5E_-)]}.$$

Если для наглядности положить  $E_+ \ll 2$  и  $\tau_1 = \tau_2 = \tau$  (непринципиальные упрощения), при  $\mu \ll E_-$  условие устойчивости запишется в виде

$$\lambda^{-1} > \frac{\tau E_-(1 + 0,5\mu) - 3E_+}{4[E_+ + E_-(1 + 0,5\mu)]}.$$

Из полученного выражения видно, что с увеличением комплекса  $E_-(1 + 0,5\mu)$  возрастает правая часть неравенства, что приводит к расширению области периодической неустойчивости.

Несложно заметить, что при  $E_- \lesssim 3E_+$  последнее неравенство выполняется при любых параметрах (нет границы устойчивости). Это является следствием того, что цепь «кинетика – средняя температура теплоносителя – температура теплоносителя на входе в зону – кинетика» «шунтируется» короткой связью «кинетика – средняя температура теплоносителя – кинетика», ухудшая фазовое условие, необходимое для колебаний (не менее трех инерционных звеньев). Шунтирующий эффект реализуется и по доплер-эффекту, однако он, как правило, мал и не принципиален для модели-механизма. Исходя из сказанного, модель-механизм для описания рассматриваемых обшконтурных колебаний в случае  $\alpha_- \leq \alpha_+$  должна быть дополнена звеньями, увеличивающими фазовое запаздывание между кинетикой и температурой теплоносителя в зоне, например, путем включения в цепь обратной связи положительного эффекта [8, с. 151], в данном варианте – барометрического при соответствующем усложнении исходной модели ( $\delta\rho \sim \delta\gamma_{вх} + \delta\gamma_{вых} \sim \partial\gamma/\partial i[\delta i_{вх} + \delta i_{вых}] + 2[\partial\gamma/\partial P]\delta P$ , где  $\gamma$ ,  $i$  и  $P$  – плотность, энтальпия и давление теплоносителя). В качестве примечания следует отметить, что при этом реализация положительного аксиального офсета (АО) в совокупности со слабой зависимостью коэффициента размножения от нейтронного поля ( $k_{эф} \sim \int \Phi^x(v)dv$ ,  $x < 1$ ) формирует дополнительный коэффициент усиления цепи обратной связи [2], снижая запасы до границы устойчивости.

Однако можно получить границу устойчивости другим путем. Идея заключается в ослаблении вклада шунтирующей связи – при существенно превалирующем над  $\alpha_+$  значении  $\alpha_-$ . В практическом плане подобная ситуация может реализоваться при локализации аксиального поля в низу активной зоны при сильной зависимости коэффициента размножения от поля (как, например, в односкоростном приближении теории возмущений  $k_{эф} \sim \int \Phi^2(v)dv$  [9]). При этом полагается не слишком сильное ослабление  $k_{эф}$  при переходе от  $\theta_{вых}$  до  $\theta_{вх}$ .

Этот второй вариант и лег в основу рассматриваемых здесь моделей с разделением коэффициента реактивности на две составляющие, упрощающие аналитические исследования.

С точки зрения исследований параметрического воздействия на автоколебания оба варианта в качестве механизмов неустойчивости являются равноправными и оба имеют прикладное инженерное значение.

### Модель с подключением КД к входу активной зоны

$$\left. \begin{aligned}
 \rho n_0 - \beta n + l\lambda C &= 0, \\
 l \frac{dC}{dt} &= \beta n - l\lambda C, \\
 \rho &= \frac{1}{2} (\alpha_+ [\theta_{\text{ВЫХ}} - \theta_{\text{ВЫХ.0}}] + \alpha_- [\theta_{\text{ВХ}} - \theta_{\text{ВХ.0}}]), \\
 \theta_{\text{СР}} &= \frac{1}{2} (\theta_{\text{ВЫХ}} + \theta_{\text{ВХ}}), \\
 m_1 c_p \frac{d\theta_{\text{СР}}}{dt} &= Qn + c_p G (\theta_{\text{СМ}} - \theta_{\text{ВЫХ}}), \\
 m_2 \frac{d\theta_{\text{ВХ}}}{dt} &= G (\theta_{\text{ВЫХ}} - \theta_{\text{ВХ}}), \\
 \theta_{\text{СМ}} &= \frac{\theta_{\text{ВХ}} G + \theta_{\text{КД}} G_{\text{КД}}}{G + G_{\text{КД}}} \Big|_{\theta_{\text{КД}} \rightarrow 0^\circ\text{C}} \approx \theta_{\text{ВХ}} \left( 1 - \frac{G_{\text{КД}}}{G} \right), \\
 \frac{G_{\text{КД}}}{G} &= \left[ \frac{\theta_{\text{ВЫХ}}}{\theta_{\text{ВЫХ.0}}} \left( 0,28 \sin(\Omega t) - 0,49 + \frac{0,21}{\sin(\Omega t)} \right) \right] \mu
 \end{aligned} \right\} (3)$$

### Анализ модели

Делая аналогичные преобразования, получим характеристическое уравнение линеаризованной системы:

$$\lambda^{-1} \tau_1 \tau_2 \rho^3 + \lambda^{-1} [2\tau_1 + \tau_2 (2 + E_+) - \tilde{\mu} \tau_2] \rho^2 + [E_+ (\lambda^{-1} + \tau_2) + \lambda^{-1} E_- + \tilde{\mu} \lambda^{-1}] \rho + E_+ + E_- \approx 0,$$

где  $\tilde{\mu} = \mu \theta_{\text{ВХ.0}} / \theta_{\text{ВЫХ.0}}$ .

Условие устойчивости по критерию Рауса – Гурвица:

$$\lambda^{-1} > \frac{\tau_1 \tau_2 E_- - E_+ \tau_2 [ \tau_1 + \tau_2 (2 + E_+) - \tilde{\mu} \tau_2 ]}{(E_+ + E_- + \tilde{\mu}) [2\tau_1 + \tau_2 (2 + E_+) - \tilde{\mu} \tau_2]}.$$

По-прежнему полагая  $E_+ \ll 2$  и  $\tau_1 = \tau_3 = \tau$ , получим условие устойчивости в виде

$$\lambda^{-1} > \frac{\tau (E_- - E_+ [3 - \tilde{\mu}])}{(E_+ + E_- + \tilde{\mu}) [4 - \tilde{\mu}]} \approx \frac{\tau}{4} \frac{(E_- - 3E_+)}{(E_+ + E_- + \tilde{\mu})},$$

откуда с увеличением  $\mu$  уменьшается правая часть неравенства, что приводит к расширению области устойчивости.

Для иллюстрации масштаба амплитуд ниже рассматривается режим изменения мощности с 10 до 100% $N_{\text{ном}}$  с учетом моделирования автоматического управления в РУ с канальной активной зоной, рассчитанный по коду ЕСКМ-3Д (с точечной моделью кинетики) [10] при варьировании координаты подключения системы КД. При этом сочетания определяющих для устойчивости параметров расчетной модели взяты из эскизных проработок одного из проектов:  $\text{АО} \approx 0,5$ ;  $\alpha_+ \approx \alpha_- \approx 0,06 \beta_{\text{эф}}/^\circ\text{C}$ ;  $\chi = 0$ .

На рисунке 2 представлена динамика параметров при подключении системы КД к выходной камере реактора («горячее» подключение:  $\bar{\tau}_{\text{см}} = \tau_{\text{см}}/\tau_{1к} \approx 0,24$ , где  $\tau_{\text{см}}$  – время прохода теплоносителя от выхода из активной зоны до точки смешения,  $\tau_{1к}$  – время прохода теплоносителя по всему первому контуру), а на рис. 3 – при подключении системы КД к участку контура на выходе из парогенератора («холодное» подключение:  $\bar{\tau}_{\text{см}} \approx 0,47$ ).

Из рисунка 2 следует, что фазы колебаний выходной температуры и давления совпадают с хорошей для использованного аналитического приближения точностью. При этом расход теплоносителя из системы КД практически совпадает по фазе с отрицательной полуволной температуры теплоносителя непосредственно на выходе из активной зоны, тогда как температура на входе в активную зону колеблется практически в противофазе с температурой на выходе. Поэтому сближение координаты подключения системы КД с выходом из активной зоны приводит к параметрическому усилению колебаний, тогда как сближение ее с входом в активную зону – к их демпфированию. Однако фазовое демпфирование следует ожидать и при «горячем» подключении КД в условиях снижения объема контура за счет «холодных» участков ( $\bar{\tau}_{\text{см}}$  увеличивается).

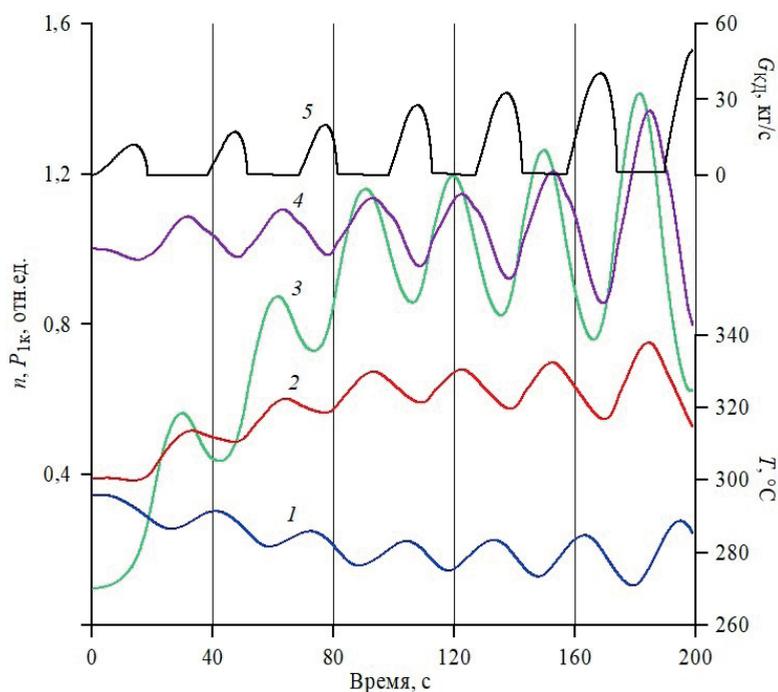


Рис. 2. Маневр при «горячем» подключении КД. Динамика параметров: 1 – температура на входе в реактор; 2 – усредненная температура на выходе из активной зоны; 3 – нейтронная мощность; 4 – давление в реакторе; 5 – расход теплоносителя, поступающего из системы КД

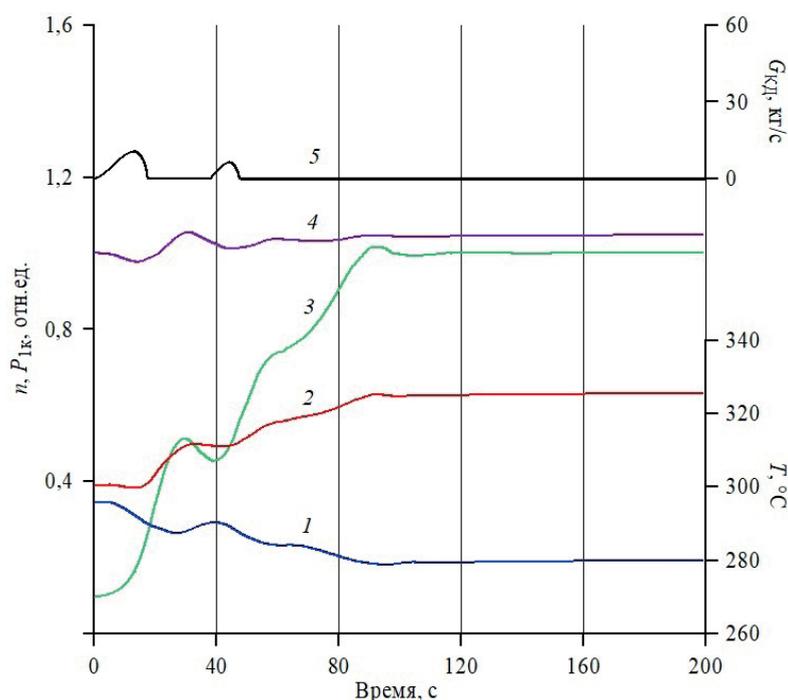


Рис. 3. Маневр при «холодном» подключении КД. Динамика параметров: 1 – температура на входе в реактор; 2 – усредненная температура на выходе из активной зоны; 3 – нейтронная мощность; 4 – давление в реакторе; 5 – расход теплоносителя, поступающего из системы КД

Снижение объема теплоносителя в активной зоне за счет межканального пространства (МКП), что может быть интерпретировано в качестве уменьшения шага расположения тепловыделяющих сборок в активной зоне или в качестве приближения ее к кассетной геометрии, также дает стабилизирующий эффект. Он связан со снижением величины  $\tau_1$  и вследствие этого с уменьшением неустойчивой области. Снижение инерции зонного теплоносителя (в предельном переходе – до нуля – полученные неравенства выполняются всегда) приводит к потере функции задержки сигнала одного из трех инерционных звеньев в цепи обратной связи систем (1) и (3) и, как результат, к невозможности набрать необходимое фазовое запаздывание ( $> \pi$ ) для получения комплексных (колебательных) решений. Соответствующий расчет по коду ЕСКМ-3Д представлен на рис. 4.

Полученный результат связан с более быстрым уменьшением фазового сдвига в кинетическом звене для одной эквивалентной группы ( $\arctg[\lambda/\omega]$ ) в сравнении с ростом фазовых сдвигов в малоинерционных температурных звеньях ( $\arctg[\tau_1\omega] + \arctg[\tau_2\omega]$ ) с ростом  $\omega$ , что, как правило, реализуется в условиях сопоставимых времен запаздывания по контуру циркуляции ( $\sim 15$  с) и обратной величины постоянной распада предшественников запаздывающих нейтронов ( $\lambda^{-1} \sim 13$  с) [7, с. 9]. Однако в иных параметрических условиях – с повышенными коэффициентом усиления в цепи обратной связи, например, за счет больших значений  $E_{\pm}$ , аксиального офсета и барометрической составляющей реактивности («жесткости» системы КД) – для набора необходимого для колебаний фазового запаздывания может оказаться достаточным вовлечение в обратную связь лишь части групп излучателей запаздывающих нейтронов с малыми периодами полураспада [11].

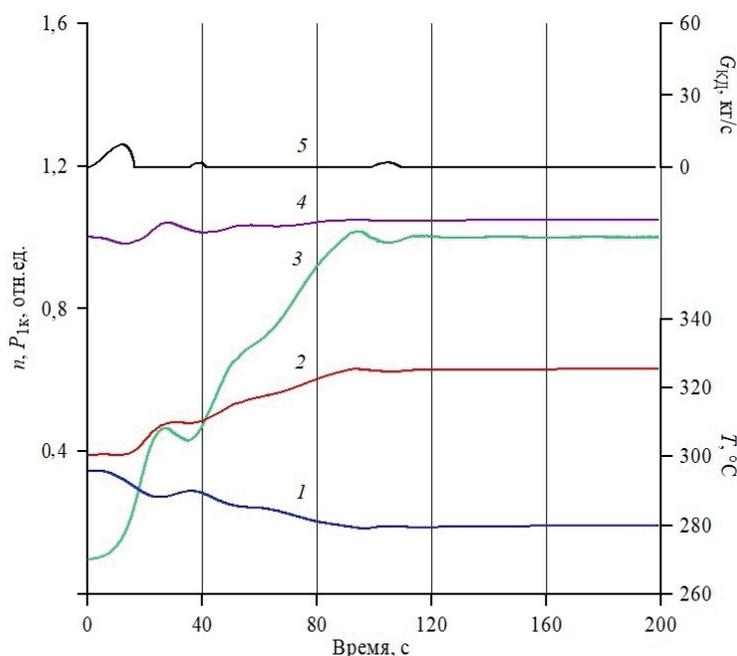


Рис. 4. Маневр при «горячем» подключении КД и уменьшенном в 3 раза объеме МКП. Динамика параметров: 1 – температура на входе в реактор; 2 – усредненная температура на выходе из активной зоны; 3 – нейтронная мощность; 4 – давление в реакторе; 5 – расход теплоносителя, поступающего из системы КД

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследований ряда схемно-конструктивных решений перспективных РУ, проектируемых по судовым технологиям, позволяют уточнить факторы, влияющие на запасы устойчивости общеконтурных процессов.

Получено, что лучшей стабилизации переходных процессов (большей отстройки от границы неустойчивости) будут способствовать минимизация «холодных» объемов первого контура, увеличивающая фазовое демпфирование колебаний; снижение гидравлических потерь на трассе «реактор – система КД», что способствует минимизации проявления положительного барометрического эффекта в динамике; применение зон кассетного типа как обладающих минимальной теплогидравлической инерцией; нейтронно-физическое профилирование, направленное на снижение абсолютных значений аксиального офсета.

## Литература

1. Петрунин В.В. Реакторные установки для атомных станций малой мощности. // Вестник Российской Академии Наук. – 2021. – Т. 91. – № 6. – С. 528–540. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182>
2. Кресов Д.Г., Куликов А.В., Оленская Е.В. Обеспечение повышенных ресурсных характеристик судовых реакторных установок. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127. – Вып. 1. – С. 8–13. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2581> (дата доступа 20.04.2024).
3. Зверев Д.Л., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Реакторные установки для атомных ледоколов. Опыт создания и современное состояние. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – Вып. 1. –

С. 29–37. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3200> (дата доступа 20.04.2024).

4. Петрунин В.В., Фадеев Ю.П., Пахомов А.Н. и др. Обликовый проект АСММ с реакторной установкой РИТМ-200. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – Вып. 6. – С. 323–327. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2506> (дата доступа 20.04.2024).

5. Хетрик Д. Динамика ядерных реакторов. Пер. с англ. – М.: Атомиздат. 1975. – 400 с.

6. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн: Учебное пособие. – М.: Наука, 1984. – 432 с.

7. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Механизмы неустойчивых процессов в тепловой и ядерной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 88 с.

8. Митенков Ф.М., Моторов Б.И. Нестационарные режимы судовых ядерных паропроизводящих установок. – Л.: Судостроение, 1970. – 200 с.

9. Галанин А.Д. Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 416 с.

10. Клочков О.Б., Куликов А.В., Давыдов А.В., Кресов Д.Г. Инженерная программа ЕСКМ-3Д для расчета нестационарных режимов ЯППУ с ВВРД с газовой (вынесенной) или парогазовой (встроенной) системой компенсации давления при принудительной и естественной циркуляции теплоносителя (Программа ЕСКМ-3Д). Заявка 2011614058, Рос. Федерация, заявитель и правообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов» (RU); свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2011615838; заявл. 02.06.11, зарегистр. 27.07.11.

11. Кресов Д.Г. Об условиях развития нейтронно-физических механизмов неустойчивости на части групп излучателей запаздывающих нейтронов. // ВАНТ. Физика ядерных реакторов. – 2022. – № 5. – С. 42–45.

Поступила в редакцию 22.04.2024

#### Автор

Кресов Дмитрий Геннадьевич, начальник отдела расчетов динамики систем и РУ, д.т.н.,  
E-mail: [dkresov@okbm.nnov.ru](mailto:dkresov@okbm.nnov.ru).

UDC 621.039.52

### Impact of the Parametric Effect on the Transient Stability in Modern Designs of Ship Reactor Plants

Kresov D.G.

Afrikantov OKBM JSC  
15 Burnakovsky pr., 603074 Nizhny Novgorod, Russia

#### Abstract

The new generation of ship and small nuclear power plant reactors for a wide range of applications, along with increased safety requirements, combines high specified endurance characteristics. Under certain conditions, design transients can be accompanied by prolonged alternating deviations of the reactor plant parameters from specified values, which is indicative of insufficient parametric margins to the stability boundary. One of the provoking factors of the additional thermal and baric cycling caused by this to the reactor plant equipment is the connection of the remote pressure compensation system to the hot sections of the primary circuit.

The addition of relatively cold coolant into the main circulation circuit at the pressure reduction stage increases the amplitude of the negative in-pile temperature fluctuation half-wave.

To accumulate the physical ideas of such a parametric effect, the paper considers two simplified reactor models, which differ greatly in terms of the pressure compensator connection point. The results of analyzing linearized models make it possible to conclude theoretically on the system stability area reduction as the result of coolants being mixed directly at the core outlet and, conversely, on the damping of overshoots in the event of coolants mixed at the core inlet. At the same time, the analysis has revealed a number of additional factors that affect considerably the resistance boundary. These include reactivity factors for coolant temperature and pressure, and a significant absolute value of the axial offset.

The presented calculations of one of the transients based on a nonlinear model, which confirm the obtained theoretical conclusions, illustrate the amplitudes of perturbations in some of the reactor plant parameters for different layout options, obtained from the data of draft studies for one of the designs.

The study has identified the factors that contribute to the stabilization of the reactor feedback system under self-control conditions.

**Keywords:** kinetics, phase lag, instability, thermal-hydraulic inertia.

**For citation:** Kresov D.G. Impact of the Parametric Effect on the Transient Stability in Modern Designs of Ship Reactor Plants. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 3, pp. 32–43; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.3.03> (in Russian).

## References

1. Petrunin V.V. Reactor plants for low-power nuclear power plants. *Vestnik Rossiyskoy Akademii Nauk*. 2021, v. 91, no. 6, pp. 528–540. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869587321050182> (in Russian).
2. Kresov D.G., Kulikov A.V., Olenskaya E.V. Enhanced Life Assurance for Ship Reactors. *Atomic Energy*. 2019, v. 127, pp. 8–13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00576-4>
3. Zverev D.L., Fadeev Yu.P., Pakhomov A.N., Galitskikh V.Yu., Polunichev V.I., Veshnyakov K.B., Kabin S.V., Turusov A.Yu. Reactor installations for nuclear icebreakers: Origination experience and current status. *Atomic Energy*. 2020, v. 129, pp. 18–26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00706-x>
4. Petrunin V.V., Fadeev Yu.P., Pakhomov A.N., Veshnyakov K.B., Polunichev V.I., Shamanin I.E. Conceptual Design of Small NPP with RITM-200 Reactor. *Atomic Energy*. 2019, v. 125, pp. 365–369. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00495-4>
5. David L. Hetrick. *Dynamics of nuclear reactors*. Moscow, Atomizdat, 1975, 400 p. (in Russian).
6. Rabinovich M.I., Trubeckov D.I. *Introduction to the theory of oscillations and waves: A textbook*. Moscow, Nauka Publ., 1984, 432 p. (in Russian).
7. Mitenkov F.M., Motorov B.I. *Mechanisms of unstable processes in thermal and nuclear power*. Moscow, Energoizdat., 1981, 88 p. (in Russian).
8. Mitenkov F.M., Motorov B.I. *Non-stationary modes of marine nuclear steam generating plants*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970, 200 p. (in Russian).
9. Galanin A.D. *Introduction to the theory of nuclear reactors on thermal neutrons*. Moscow, Energoatomizdat, 1984, 416 p. (in Russian).
10. Klochkov O.B., Kulikov A.V., Davidov A.V., Kresov D.G. *Engineering program ECKM-3D for calculation of non-stationary modes of NSSS with HSSE with gas (removed) or steam-gas (integrated) pressure*

*compensation system during forced and natural circulation of coolant. (ECKM-3D Program). Application 2011614058 Russian Federation; applicant and copyright holder JSC «Afrikantov OKBM» (RU); certificate of state registration of the computer program no. 2011615838; stated 02.06.11, registered 27.07.11 (in Russian).*

11. Kresov D. G. On Conditions of Development of Neutronic Mechanisms of Instability on a Portion of Groups of Emitters of Delayed Neutrons. *Physics of Atomic Nuclei*. 2023, vol. 86, no. 8, pp. 1782–1784. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063778823080094>

**Author**

Dmitry G. Kresov, head of Department, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: [dkresov@okbm.nnov.ru](mailto:dkresov@okbm.nnov.ru)