

Принципы работы быстродействующей аварийной защиты на основе гексафторида урана

© Ж.С. Такибаев,¹ С.А. Спицына,² Г.К. Потребеников,² А.В. Юшков,² К.А. Копжасарова²

¹ Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
480082 Алма-Ата, Республика Казахстан

² Казахский государственный национальный университет им. аль-Фараби,
480012 Алма-Ата, Республика Казахстан
e-mail: takibaev@ietp.alma-ata.su

(Поступило в Редакцию 17 марта 1999 г. В окончательной редакции 12 апреля 2001 г.)

Исследованы динамические свойства газожидкостных конструкций одноразовой прямодействующей аварийной защиты применительно к ядерным энергетическим установкам. Динамические параметры получены с помощью компьютерных экспериментов в рамках предложенной авторами модели. Ввод поглотителя в активную зону реактора в случае реактивной аварии осуществляется автоматически без вмешательства оператора и каких-либо внешних управляющих систем.

Введение

В концентрации ядерной безопасности одним из основных направлений реакторостроения является внутренняя самозащищенность ядерного реактора — способность его за счет отрицательных обратных связей стабилизироваться или остановиться в случае опасности тяжелой аварии. Например, оснащение реактора системой прямодействующей аварийной защиты (ПАЗ), функционирующей автономно от операторов, размещенной в активной зоне реактора и реагирующей непосредственно на отклонение от установленного значения какого-либо из режимных параметров реактора. Важнейшей характеристикой подобных устройств должно быть их быстродействие, т.е. возможность достаточно быстро воспринять изменение величины контролируемого параметра и с достаточной скоростью выполнить защитное действие, которое в основном сводится к вводу в активную зону реактора сильного поглотителя нейтронов.

В цикле работ [1–4] по системам ПАЗ для повышения их быстродействия предполагается использовать в чувствительных элементах защитных устройств соединения, содержащие компоненты с большим сечением деления тепловыми нейтронами. Такие устройства воспринимают первичный признак реактивной аварии — увеличение плотности потока нейтронов, а возникающие при этом температурные эффекты используются для управления органами регулирования защитной системы, обеспечивая ввод поглотителя нейтронов в пределы активной зоны реактора.

В настоящей работе рассматривается один из возможных вариантов газожидкостной ПАЗ на основе элементов одноразового действия. Чувствительным элементом в устройствах такой защиты является газ, содержащий делящийся компонент. Исполнительный механизм срабатывает по превышению заданного уровня давления в объеме чувствительного элемента и обеспечивает ввод жидкого поглотителя нейтронов в рабочий объем элемента ПАЗ, расположенного в активной зоне реактора.

Элемент газожидкостной ПАЗ

Для размещения в активной зоне реактора размеры и форма элемента прямодействующей аварийной защиты (ЭПАЗ), очевидно, должны соответствовать какому-либо из штатных структурных элементов активной зоны реактора, например твэлу, направляющей трубке стержня регулирования СУЗ или тепловыделяющей сборке.

Исполнительный механизм (ИМ) представляет собой простейшее пневмореле, срабатывающее по превышению давления в объеме чувствительного элемента. Во введенном состоянии поглотитель нейтронов удерживается вне активной зоны, при срабатывании ИМ металлический сильфон смещается вверх, обеспечивая поступление поглотителя нейтронов в рабочий объем.

Условия герметичности и точности изготовления пневмореле [5,6] определяют рабочее давление, которое в устройствах пневмоавтоматики составляет 0.12–0.18 МПа [7]. Порог срабатывания релейных устройств выбирают обычно на 20–40% меньше. Примем за порог срабатывания p_{lim} пневмореле исполнительного механизма ЭПАЗ величину 10^5 Па. Для реализации смещений золотника вместо сильфона, работающего на растяжение, в пневмореле можно использовать поршневые устройства, однако герметическое соединение сильфона с корпусом чувствительного элемента лучше обеспечит отсутствие утечек делящегося компонента.

В качестве чувствительного элемента для устройств прямодействующей аварийной защиты в работах [1,2] предложено использовать газообразное соединение UF_6 , которое при внутриреакторных температурах можно считать идеальным газом [8] и теплофизические свойства которого подробно изучены [9–11].

При обогащении χ урана в UF_6 изотопом ^{235}U объемная концентрация делящихся ядер в чувствительном

элементе равна

$$\gamma_5 = \frac{N_A \rho_U \chi}{\mu_U}, \quad (1)$$

где N_A — число Авогадро, ρ_U — плотность UF_6 , μ_U — молярная масса UF_6 (далее индекс 5 относится к ^{235}U , индекс U — к UF_6 ; молярная масса вычисляется без учета обогащения).

Чувствительный элемент — это объемный источник с удельной мощностью энерговыделения q_v

$$q_v = E_f \Sigma_f \Phi, \quad (2)$$

где E_f — энерговыделение в акте деления, $\Phi = \Phi_0 n$, n — относительная плотность потока нейтронов, Φ_0 — плотность потока нейтронов для стационарного состояния, $\Sigma_f = \gamma_5 \sigma_f$, Σ_f и σ_f — макроскопическое и микроскопическое сечения деления ядер ^{235}U тепловыми нейтронами соответственно.

Квазистационарное уравнение теплопроводности для бесконечного цилиндра [12]

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\Theta - t}{\tau_0} + an, \quad (3)$$

где t — средняя температура тепловыделяющего элемента, Θ — температура теплоносителя, $a = q_v / \rho' C$, $\tau_0 = \xi RC \rho' / 2$.

Для стержневого твэла радиуса R без оболочки с плотностью ρ' и удельной теплоемкостью C термическое сопротивление ξ определяется коэффициентом теплопроводности λ материала сердечника $\xi = R/4\lambda$. Для твэла в оболочке толщиной δ при идеальной теплоотдаче от оболочки к теплоносителю $\xi = R/4\lambda + \delta/\lambda_1$, где λ_1 — коэффициент теплопроводности оболочки. Обычно $\lambda_1 \gg \lambda$ и в оценках вторым слагаемым в выражении для ξ пренебрегают. Два геометрических параметра (r — радиус чувствительного элемента и R_1 — внешний радиус оболочки ЭПАЗ) использованы при моделировании динамики $a = q_v / \rho_U C_U$, $\tau_0 = \xi R_1 C_U \rho_U / 2$, $\xi = r/4\lambda_U$. В стационарном состоянии ($\tau = 0$) средняя температура чувствительного элемента t_0 : $t_0 = \Theta + a\tau_0$. Соответствующее этой температуре давление p_0 в объеме чувствительного элемента не должно превосходить давления p_{lim} , при котором срабатывает ИМ ЭПАЗ,

$$p_0 = \frac{\rho_U R_m}{\mu_U} t_0 < p_{lim}, \quad (4)$$

где R_m — универсальная газовая постоянная.

Поскольку p_{lim} задается техническими характеристиками ИМ, то диапазон возможных значений плотности UF_6 ограничен сверху неравенством $\rho_U < \mu_U p_{lim} / R_m \Theta$. При $p_{lim} = 10^5$ Па и $\Theta = 579$ К $\rho_U < 7.25$ кг/м³. Срабатыванию ЭПАЗ соответствует температура $t_{lim} = \mu_U p_{lim} / \rho_U R_m$, которая должна достигаться при пороговом значении плотности потока нейтронов n_{lim} . Рост температуры происходит с запаздыванием по отношению к росту плотности нейтронного потока. Тепловая инерционность ЭПАЗ определяется его

постоянной времени τ_0 , значение которой можно выбрать задавая плотность UF_6 в чувствительном элементе. При заданном ρ_U $p_{lim} = \rho_0 t_{lim} / t_0$.

Пусть ЭПАЗ расположен в направляющей трубке стержня регулирования ВВЭР1000, тогда для $n_{lim} = 1.4$ при $E_f = 3.14 \cdot 10^{-11}$ Дж [13] $\sigma_f = 580.2 \cdot 10^{-28}$ м². При этом средняя плотность потока нейтронов $\Phi_0 = 10^{18}$ с⁻¹ · м⁻², а температура теплоносителя в активной зоне реактора ВВЭР1000 $\Theta = 579$ К [14], $r = 0.004$ м и $R_1 = 0.0063$ м. Температурную зависимость параметров a и τ_0 следует учитывать при решении уравнения (3); в этом случае возможно только численное его решение.

Поведение ЭПАЗ при вводе положительной реактивности можно описать, решая уравнение теплопроводности (3) совместно с системой уравнений точечной кинетики [12],

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{\rho - \beta}{l} n + \Sigma \lambda_i C_i, \quad n(\tau = 0) = 1,$$

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i, \quad C_i(\tau = 0) = \frac{\beta_i}{l \lambda_i}, \quad i = 1, \dots, 6, \quad (5)$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\Theta - t}{\tau_0} + an, \quad t(\tau = 0) = t_0,$$

где t_0 — решение уравнения $t - \Theta = a(t)\tau_0(t)$.

Решения системы (5) при вводе положительной реактивности $\rho = 0.9\beta$ в начальный момент времени ($\tau = 0$) даны на рис. 1, а, где приведены средняя температура и давление в чувствительном элементе при $\rho_U = 5$ кг/м³ и $\chi = 0.45$; штриховыми прямыми, параллельными оси абсцисс, отмечены значения, соответствующие стационарному режиму и срабатыванию ИМ. Время запаздывания срабатывания ИМ ЭПАЗ составляет десятки миллисекунд от начала разгона реактора. Запаздывание при срабатывании автоматической аварийной защиты реактора может достигать нескольких сот миллисекунд [15]. Для еще большего сокращения времени запаздывания срабатывания ЭПАЗ следует увеличить степень обогащения UF_6 изотопом ^{235}U . Из рис. 2, б видно, что это удастся сделать ценой повышения температуры и давления в чувствительном элементе ЭПАЗ во взведенном состоянии.

Скорость срабатывания ПАЗ

Жидкие поглотители нейтронов в основном применяются для компенсации избыточной реактивности, например в системах борного регулирования реакторов ВВЭР [16]. С помощью растворенного в замедлителе бора [17] можно регулировать лишь медленные изменения реактивности. В работе [15] обсуждаются предложения по СУЗ с использованием жидких поглотителей, которые циркулируют в герметических трубопроводах по специальным каналам в активной зоне.

Сильным поглотителем тепловых нейтронов является гадолиний с $\sigma_a = 4.6 \cdot 10^{-24}$ м², например в виде

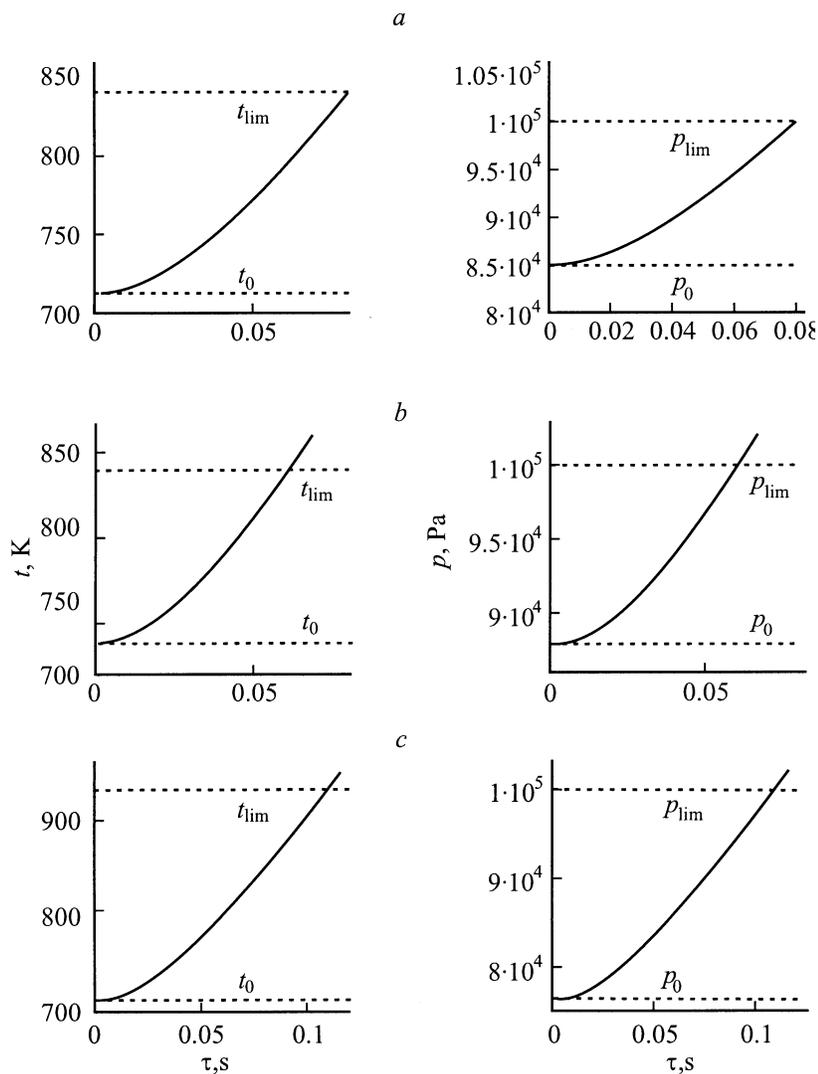


Рис. 1. Средняя температура и давление в чувствительном элементе при $\rho = 0.9\beta$ и $\tau = 0$. *a* — $\rho_U = 5 \text{ kg/m}^3$ и $\chi = 0.045$; *b* — $\rho_U = 5 \text{ kg/m}^3$ и $\chi = 0.055$; *c* — $\rho_U = 4.5 \text{ kg/m}^3$ и $\chi = 0.05$.

$\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$ [18]. При плотности $\rho_{\text{Gd}} > 3000 \text{ kg/m}^3$ макроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3$ превышает 250 cm^{-1} и заполненный им рабочий объем ЭПАЗ можно рассматривать как черный поглощающий стержень [19], введенный в активную зону реактора. При гидравлическом рассмотрении резервуар с поглотителем нейтронов с внутренним радиусом R представляет собой круглый канал с гидравлическим диаметром $d_l = 2R$, а рабочий объем поглотителя — кольцевой канал с гидравлическим диаметром $d = 2(R - r)$, где r — внутренний радиус кольцевого канала. Течение поглотителя ламинарное, стабилизирующееся на участках, сопоставимых с размерами гидравлических диаметров. Сопротивления трения для круглого и кольцевого каналов длиной l и h соответственно равны [20]

$$\Delta P_1 = \xi_1 \frac{l}{d_1} \left(\frac{\rho_{\text{Gd}} v_1^2}{2} \right), \quad \Delta P = \xi \frac{h}{d} \left(\frac{\rho_{\text{Gd}} v^2}{2} \right), \quad (6)$$

где v_1 и v — средние по сечению скорости стабилизированного течения в круглом и кольцевом каналах соответственно, ξ_1 и ξ — коэффициенты гидравлического сопротивления круглого и кольцевого каналов $\xi_1 = 64/\text{Re}_1$, $\xi = 64F(\Theta)/\text{Re}$, $F(\Theta) = (1 - \Theta)^2 / [1 + \Theta^2 + (1 - \Theta)^2 / \ln \Theta]$, $\Theta = r/R$, где Re_1 и Re — числа Рейнольдса для круглого и кольцевого каналов соответственно [21]. Подставляя значения ξ_1 и ξ , получим $\Delta P_1 8\eta l v_1 / R^2$, $\Delta P = 8\eta l v F(\Theta) / [R^2 (1 - \Theta^2)]$, где η — динамическая вязкость. Формулы Пуазейля для круглого и кольцевого каналов получим, выражая скорости через сопротивления трения $v_1 = R^2 \Delta P_1 / 8\eta l$, $v = R^2 (1 - \Theta^2) \Delta P / 8\eta h F(\Theta)$. Для ЭПАЗ с $R = 0.0059 \text{ m}$ высота активной зоны $H = 3.66 \text{ m}$; положим $r = 0.004 \text{ m}$, как это было принято ранее. При температуре теплоносителя $\eta = 0.085 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ $\rho_{\text{Gd}} = 3430 \text{ kg/m}^3$. Поглотитель, необходимый для заполнения рабочего объема на всю глубину активной зоны, заполняет резервуар до уровня $L = (1 - \Theta^2) H$.

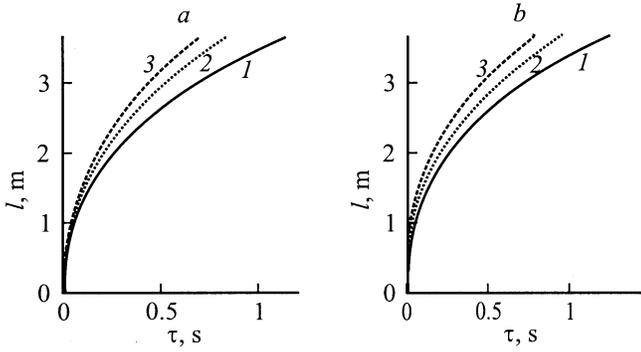


Рис. 2. Уровень погружения органа регулирования ЭПАЗ в активную зону реактора после срабатывания ИМ. *a* — $P_0 = 1.5 \text{ МПа}$; ε : 1 — 0.1, 2 — 0.15, 3 — 0.2; *b* — $\varepsilon = 0.1$; P_0 , МПа: 1 — 1.4, 2 — 1.8, 3 — 2.2.

Он создает гидростатический напор, равный $\rho g L$. Этот гидростатический напор поглотителя в резервуаре не позволяет обеспечить необходимую скорость ввода поглотителя в рабочий объем ЭПАЗ. Она возрастает, если дополнительное давление в резервуаре обеспечивается сжатым газом.

Пусть P_0 — начальное давление газа в резервуаре; толщину газовой прослойки ε будем выражать в единицах высоты активной зоны $L_0 - L = \varepsilon H$. За время τ после срабатывания ИМ часть поглотителя из резервуара поступит в рабочий объем, заполнив его до уровня h ; соответственно уровень поглотителя в резервуаре понизится с начального уровня L до уровня $l = L - (1 - \Theta^2) h$. Тогда $P = P_0(L_0 - L)/(L_0 - l) = P_0(L_0 - L)/[L_0 - L + (1 - \Theta^2) h]$. Поскольку мгновенный расход при течении несжимаемой жидкости одинаков в любом сечении, то $v_1 = (1 - \Theta^2) v$. Отсюда получаем

$$v(h) = \frac{P_0 \varepsilon R^2}{8\eta(1 - \Theta^2)H[\varepsilon + (1 - \Theta^2)h/H]} \times \left\{ 1 - [1 - F(\Theta)/(1 - \Theta^2)]^2 h/H \right\} \quad (7)$$

Интерпретируя $v(h)$ как скорость смещения уровня поглотителя в рабочем объеме, получим уравнение для уровня погружения органа регулирования ЭПАЗ в активную зону после срабатывания ИМ

$$\frac{dh}{d\tau} v(h), \quad h(\tau = 0) = 0. \quad (8)$$

На рис. 2 показаны решения уравнения (8) при различной начальной толщине газовой прослойки ε и различных начальных давлениях газа P_0 в резервуаре. Видно, что рабочий орган ЭПАЗ может быть введен в активную зону за время, сопоставимое с временем ввода стержней автоматической аварийной защиты реактора при гашении реактивной аварии.

Моделирование реактивной аварии

Поведение ЭПАЗ в условиях реактивной аварии описывается системой уравнений, включающей уравнение точечной кинетики и уравнения (3) и (8),

$$\frac{dn}{d\tau} = \frac{\rho - \delta\rho(h) - \beta}{l} n + \sum \lambda_i C_i, \quad n(\tau = 0) = 1,$$

$$\frac{dC_i}{d\tau} = \frac{\beta_i}{l} n - \lambda_i C_i, \quad C_i(\tau = 0) = \frac{\beta_i}{l\lambda_i}, \quad i = 1, \dots, 6,$$

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{\Theta - t}{l} + an, \quad t(\tau = 0) = t_0, \quad t(\tau \geq \tau_{\text{lim}}) = t_{\text{lim}},$$

$$\frac{dh}{d\tau} = v(h), \quad h(\tau \leq \tau_{\text{lim}}) = 0, \quad h(\tau > \tau_{\text{lim}} + \tau_{1\text{lim}}) = H, \quad (9)$$

где τ_{lim} — время срабатывания ИМ ЭПАЗ; $\tau_{1\text{lim}}$ — время, за которое поглотитель вводится в рабочий объем ЭПАЗ.

Система ПАЗ дополняет автоматическую аварийную защиту реактора [22]. В работе [14] приводится значение пороговой плотности потока нейтронов $n_{\text{lim}} = 1.2$; в настоящей работе положим $n_{\text{lim}} = 1.4$.

Реактивную аварию моделируют, задавая режим ввода положительной реактивности функцией $\rho(t)$ в уравнениях точечной кинетики. При вводе положительной реактивности с постоянной скоростью $\rho(\tau) = v_\beta \beta \tau$, $\tau \geq 0$, где v_β — скорость ввода положительной реактивности в единицах суммарной доли запаздывающих нейтронов β , целесообразно ограничить величину вводимой реактивности:

$$\rho(\tau) = \begin{cases} \rho_0 v_\beta \beta \tau, & 0 \leq \tau \leq \tau_{\text{max}}, \\ \rho_0 v_\beta \beta \tau_{\text{max}}, & \tau > \tau_{\text{max}}. \end{cases} \quad (10)$$

При фиксированном τ_{max} малым значениям v_β соответствует медленный ввод относительно небольшой реактивности; при больших v_β большая реактивность вводится с большой скоростью. Далее будем полагать $\tau_{\text{max}} = 1 \text{ с}$.

На рис. 3 показаны решения системы уравнений (9) при моделировании реактивной аварии вводом положительной реактивности с различными скоростями. Из рис. 3, *a* видно, что газожидкостная ПАЗ срабатывает тем быстрее, чем опаснее режим аварийного разгона реактора. На рис. 3, *b* приведены решения системы уравнений (9) при большем начальном давлении газа в резервуаре с поглотителем нейтронов. Быстродействие газожидкостной ПАЗ возрастает за счет уменьшения времени ввода поглотителя нейтронов в активную зону. На рис. 3, *c* приведены решения системы уравнений (9) для срабатывания газожидкостной ПАЗ на меньшем уровне мощности при аварийном разгоне реактора для большего

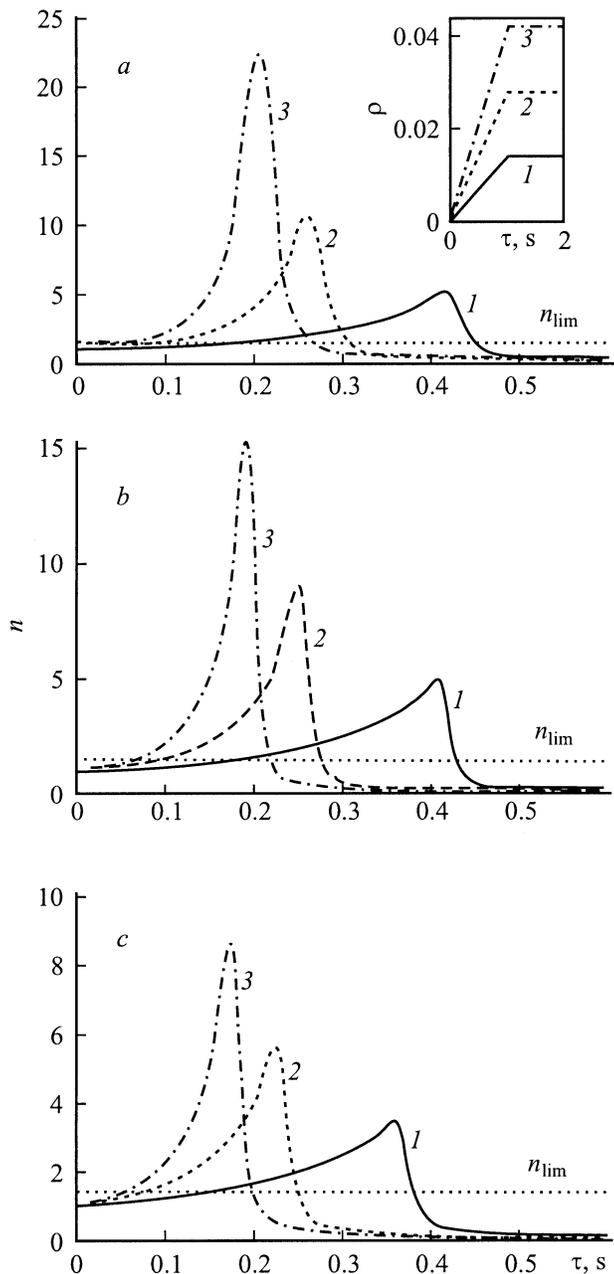


Рис. 3. Гашение реактивной аварии, вызванной вводом положительной реактивности с различными скоростями $v_1 = 2$ (1), $v_2 = 4$ (2), $v_3 = 6 \text{ s}^{-1}$ (3); параметры ПАЗ: $\varepsilon = 0.2$, $\rho_U = 5 \text{ kg/m}^3$; а — $P_0 = 1 \text{ МПа}$, $\chi = 0.05$, $\tau_{1 \text{ lim}} = 1.08 \text{ s}$; $\tau_{\text{lim}} = 0.4$ (1), 0.24 (2), 0.18 s (3); б — $P_0 = 2 \text{ МПа}$, $\chi = 0.05$, $\tau_{1 \text{ lim}} = 0.54 \text{ s}$; $\tau_{\text{lim}} = 0.4$ (1), 0.24 (2), 0.18 s (3); в — $P_0 = 2 \text{ МПа}$, $\chi = 0.06$, $\tau_{1 \text{ lim}} = 0.54 \text{ s}$; $\tau_{\text{lim}} = 0.35$ (1), $\tau_{\text{lim}} = 0.22$ (2), $\tau_{\text{lim}} = 0.16 \text{ s}$ (3).

обогащения урана в чувствительном элементе ЭПАЗ. Быстродействие газожидкостной ПАЗ возрастает за счет уменьшения времени запаздывания срабатывания ИМ.

Результаты моделирования реактивной аварии ядерного реактора показывают, что рассмотренная система аварийной защиты обладает хорошим быстродействием.

Список литературы

- [1] Такибаев Ж.С. Препринт НЯЦ РК. Алматы, 1996. № 3-96. 24 с.
- [2] Такибаев Ж.С. // Изв. МН-АН РК. Сер. физ.-мат. 1997. № 2. С. 54–62.
- [3] Такибаев Ж.С. // Proc. Fujii-e Symposium "Various Methods to Operate and Control Processes in an Active Zone in Condition of Extraordinary Situation". Tokyo, 1996. P. 225.
- [4] Такибаев Ж.С. // Тез. докл. Междунар. научно-практ. конф. "Ядерная энергетика в Республике Казахстан, перспективы развития (ЯЭ-0,6)". Актау (Казахстан), 1996. С. 71.
- [5] Балакирев И.С., Софиев А.Э. Применение средств пневмо- и гидроавтоматики в химических производствах. М.: Химия, 1973. 176 с.
- [6] Лемберг М.Д. Релейные системы пневмоавтоматики. М.: Энергия, 1968. 143 с.
- [7] Дмитриев В.Н., Градецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
- [8] Верхивкер Г.И., Тельбаум С.Д., Коняева Г.П. // Атомная энергия. 1968. Т. 24. Вып. 2. С. 158–162.
- [9] Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений. М.: Химия, 1987. 172 с.
- [10] Малышев В.В. // Теплофизические свойства газов. М.: Наука, 1976. С. 97–105.
- [11] Бакулин С.С., Улыбин С.А., Жердяев Е.П. // Теплофизические свойства газов. М.: Наука, 1976. С. 40–45.
- [12] Кузнецов И.А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах. М.: Энергоатомиздат, 1987. 176 с.
- [13] Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Энергоатомиздат, 1986. 472 с.
- [14] Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. М.: Энергоатомиздат, 1990. 352 с.
- [15] Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических установок. М.: Атомиздат, 1975. 280 с.
- [16] Сидоренко В.А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М.: Энергоатомиздат, 1977. 216 с.
- [17] Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхуттов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 с.
- [18] Харрер Дж.М. Техника регулирования ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1967. 494 с.
- [19] Дементьев Б.А. Кинетика и регулирование ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 271 с.
- [20] Кириллов П.А., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). М.: Энергоатомиздат, 1990. 360 с.
- [21] Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 412 с.
- [22] Ионайтис Р.Р., Шведов Н.Л. // Атомная техника за рубежом. 1988. № 1. С. 10–21.