

УДК 621.039.514

## ИМПУЛЬСНЫЙ ХАОС В РЕАКТОРАХ С ГАЗООБРАЗНЫМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

© 2012 г.

Н.С. Постников

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

postnikv@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 27.10.2011

Выяснено, что за счет реализации импульсных стохастических режимов можно существенно увеличить мощность реакторов с газообразным ядерным топливом. Представлены схемы реакторов, в которых циркуляция газообразного топлива через активную зону осуществляется исключительно за счет механических колебаний газа, сопровождающих нейтронные импульсы.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, газообразное топливо, нейтронный импульс, динамический хаос.

### Введение

Реакторы с газообразным ядерным топливом являются одним из перспективных типов ядерных реакторов [1]. В большинстве существующих проектов их работа предусмотрена в устойчивых стационарных режимах, в которых переменные, определяющие состояние реактора, зависят от пространственных координат, но не зависят от времени. В работах [2, 3] показано, что при увеличении стационарной мощности и возникновении акустической неустойчивости в реакторах этого типа могут реализовываться автоколебательные импульсные стохастические режимы. Они состоят в том, что в реакторе через случайные промежутки времени реализуются нейтронные импульсы случайной интенсивности. Эти импульсы реализуются за счет действия внутренней плотностной обратной связи по реактивности, а не за счет внешнего периодического изменения реактивности, как это предусмотрено некоторыми проектами реакторов с пульсирующей активной зоной [1]. В статье [3] определены механизмы и условия

возникновения акустического импульсного хаоса, начато исследование допустимости и целесообразности его реализации в реакторах с газообразным топливом, а в работе [4] показана возможность управления стохастическими режимами.

В настоящей работе представлены новые результаты по исследованию импульсных стохастических режимов в реакторах с газообразным ядерным топливом. Впервые при изучении импульсного хаоса рассмотрен замкнутый контур циркуляции топливного газа. Представлены новые схемы реактора с полуоткрытыми входами и выходами активной зоны. Проведен расчет мощности реактора в режиме импульсного хаоса. Показано, что эта динамическая мощность может существенно превосходить стационарную мощность реактора. Исследована возможность осуществления циркуляции топливного газа через активную зону и теплообменник за счет механических колебаний газа, сопровождающих нейтронные импульсы.

### Схема реактора

Рассматривается реактор, схема которого представлена на рис. 1. Здесь 1 – это активная зона, выполненная в виде цилиндра или параллелепипеда длиной  $H$  и состоящая из блоков замедлителя 2 и каналов 3 с топливным газом (гексафторидом урана  $UF_6$ ). В схеме имеются два резервуара 4, 5 (нижняя и верхняя смесительные камеры). Цифрами 6 и 7 на рис. 1 обозначены вход и выход активной зоны (выход и вход камер). Предполагается, что в камерах 4, 5 находятся теплообменники – такие, что если в камеры из активной зоны поступает нагретый газ, то из них выходит газ, охлажденный до за-

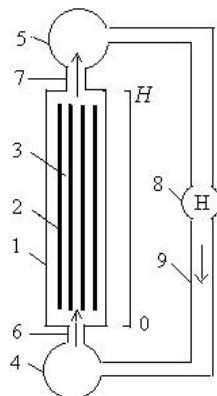


Рис. 1. Схема реактора с газообразным топливом

данной температуры  $T_0$ . В случае реактора с принудительной циркуляцией газа его движение через активную зону и теплообменники осуществляется с помощью насоса 8 (газодувки), который расположен на участке 9. Если в схеме на рис. 1 насос 8 отсутствует, то получаем реактор, в котором газообразное топливо в стационарном режиме неподвижно. В таком реакторе отбор тепла от неподвижного и нагреваемого в активной зоне газа осуществляется через стенки каналов активной зоны путем теплообмена со средой низкой температуры. Рассматривается схема реактора с открытым входом и выходом активной зоны, когда газ может поступать как из активной зоны в обе смешительные камеры, так и из камер в активную зону. Рассматривается также схема реактора с полуоткрытым входом и выходом, когда в реакторе предусмотрены специальные устройства, пропускающие топливный газ из камеры 4 в активную зону и из активной зоны в камеру 5, но не пропускающие газ в обратных направлениях.

### Математическая модель

Для описания динамики реактора использована математическая модель

$$l \partial N / \partial t = L^2 \partial^2 N / \partial x^2 + (k_\infty - 1 - \beta) N + l \sum \lambda_i C_i; \quad (1)$$

$$N(0, t) = N(H, t) = 0;$$

$$C_i = C_{i0} = \text{const}; k_\infty = k_\infty^0 + \varepsilon (\rho - \rho_0); \quad (2)$$

$$k_\infty^0 = 1 + L^2 \pi^2 / H^2;$$

$$\partial \rho / \partial t + \partial (\rho \omega) / \partial x = 0; \quad (3)$$

$$\rho \omega \partial / \partial t + \rho \omega \partial \omega / \partial x + \partial P / \partial x + (\lambda / 2D) \rho \omega |\omega| = 0; \quad (4)$$

$$\rho c_v (\partial T / \partial t + \omega \partial T / \partial x) + P \partial \omega / \partial x = Q; \quad (5)$$

$$Q = AN\rho; P = R\rho T;$$

$$P(0, t) = P_1; P(H, t) = P_2; P_i = R\rho_i T_0; \quad (6)$$

$$T_i = T_0; i = 1, 2;$$

$$V_k d\rho_1 / dt = G - \omega(0, t) \rho_1^* S; \quad (7)$$

$$\rho_1^* = \rho_1 \text{ при } \omega(0, t) > 0;$$

$$\rho_1^* = \rho(0, t) \text{ при } \omega(0, t) < 0;$$

$$V_k d\rho_2 / dt = \omega(H, t) \rho_2^* S - G; \quad (8)$$

$$\rho_2^* = \rho_2 \text{ при } \omega(H, t) < 0;$$

$$\rho_2^* = \rho(H, t) \text{ при } \omega(H, t) > 0;$$

$$(H_1 / S_1) dG / dt = (P_2 - P_1) + P_{\text{нас}} - G^2 / \gamma. \quad (9)$$

Здесь  $x \in [0, H]$ ;  $H$  – длина активной зоны;  $N(x, t)$  – плотность нейтронов;  $t$  – время;  $L^2$  – квадрат длины миграции;  $k_\infty$  – коэффициент размножения;  $C_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $\beta$  – концентрации, постоянные распада и суммарная доля излучателей запаздывающих нейтронов;  $l$  – время жизни мгновенных нейтронов;  $\varepsilon$  – коэффициент реактивности по плотности топлива;  $\rho(x, t)$ ,  $P(x, t)$ ,

$T(x, t)$ ,  $\omega(x, t)$  – плотность, давление, температура и скорость топлива в активной зоне;  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  – эквивалентный диаметр канала;  $R$  – газовая постоянная;  $c_v$ ,  $c_p$  – удельная теплоемкость горючего при постоянном объеме и давлении;  $A = \text{const}$ ; индекс 0 означает стационарный режим;  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $V_k$  – температуры, давления, плотности и объем топливного газа в нижней и верхней камерах;  $S$ ,  $V$  – общее сечение каналов и общий объем газа в активной зоне ( $S = V/H$ );  $S_1$ ,  $H_1$  – сечение и длина участка 9 с насосом;  $G$  – расход газа через этот участок;  $P_{\text{нас}}$  – напор, создаваемый насосом;  $\gamma$  – коэффициент, характеризующий гидравлическое сопротивление на участке 9.

В рамках модели (1)–(9) активная зона реактора заменена одним эквивалентным каналом постоянного сечения. Уравнения (1), (2) описывают баланс нейтронов в одноступенчатом диффузионном приближении. Считается, что концентрации запаздывающих нейтронов не изменяются в процессе колебаний. Это допустимо, поскольку исследуются высокочастотные акустические колебания, период которых много меньше времени жизни излучателей запаздывающих нейтронов. Уравнения (3)–(5) являются уравнениями неразрывности, движения, теплового баланса и состояния для топлива (предполагается, что топливо является идеальным газом). Уравнения (6)–(8) описывают изменение плотности и давления топливного газа в смешительных камерах. Уравнение (9) описывает изменение расхода газа на участке, соединяющем верхнюю и нижнюю камеры.

Уравнения (1)–(9) имеют стационарное решение  $N_0(x) = N_{0c} \sin \pi x / H$ ;  $\rho_0(x)$ ;  $P_0(x)$ ;  $T_0(x)$ ;  $\omega_0(x)$ ;  $P_{10}$ ;  $P_{20}$ ;  $\rho_{10}$ ;  $\rho_{20}$ ;  $G_0$ . После замены переменных

$$\tau = t / (H / c_0(0)); \xi = x / H; \bar{\rho} = \rho / \rho_0(0);$$

$$\bar{\omega} = \omega / c_0(0)$$

( $c_0(0) = (P_0(0) / \rho_0(0))^{1/2}$  – скорость звука на входе канала);

$$\bar{P} = P / P_0(0); \bar{T} = T / T_0 (T_0 = T_1 = T_2 = T_0(0)); \quad (10)$$

$$\bar{N} = N / N_{0c}; \bar{\rho}_i = \rho_i / \rho_0(0);$$

$$\bar{P}_i = P_i / P_0(0); \bar{T}_i = T_i / T_0; i = 1, 2;$$

$$\bar{G} = G / (c_0(0) \rho_0(0) S); \bar{P}_{\text{нас}} = P_{\text{нас}} / P_0(0)$$

уравнения (1)–(9) преобразуются к виду

$$\alpha_3 \partial \bar{N} / \partial \tau = \alpha_4 \partial^2 \bar{N} / \partial \xi^2 + [\alpha_4 \pi^2 + \alpha_2 (\bar{\rho} - \bar{\rho}_0(\xi)) - 1] \bar{N} + \sin \pi \xi; \bar{\rho}_0(\xi) = \rho_0(\xi H) / \rho_0(0); \quad (11)$$

$$\partial \bar{\rho} / \partial \tau + \partial (\bar{\rho} \bar{\omega}) / \partial \xi = 0; \quad (12)$$

$$\bar{\rho} \partial \bar{\omega} / \partial \tau + \partial \bar{P} / \partial \xi + \bar{\rho} \bar{\omega} \partial \bar{\omega} / \partial \xi + \alpha_\tau \bar{\rho} \bar{\omega} |\bar{\omega}| = 0; \quad (13)$$

$$\partial \bar{P} / \partial \tau + \bar{\omega} \partial \bar{P} / \partial \xi + \kappa \bar{P} \partial \bar{\omega} / \partial \xi = \bar{Q};$$

$$\bar{Q} = \alpha_1 \bar{N} \bar{\rho}; \bar{T} = \bar{P} / \bar{\rho}; \quad (14)$$

$$\bar{P}(0, \tau) = \bar{P}_1; \bar{P}(1, \tau) = \bar{P}_2; \bar{P}_i = \bar{\rho}_i;$$

$$\bar{T}_i = 1; i = 1, 2; \quad (15)$$

$$\theta d\bar{\rho}_1 / d\tau = \bar{G} - \bar{\omega}(0, \tau) \bar{\rho}_1^*;$$

$$\bar{\rho}_1^* = \bar{\rho}_1 \text{ при } \bar{\omega}(0, \tau) > 0;$$

$$\bar{\rho}_1^* = \bar{\rho}(0, \tau) \text{ при } \bar{\omega}(0, \tau) < 0; \quad (16)$$

$$\theta d\bar{\rho}_2 / d\tau = \bar{\omega}(1, \tau) \bar{\rho}_2^* - \bar{G};$$

$$\bar{\rho}_2^* = \bar{\rho}_2 \text{ при } \bar{\omega}(1, \tau) < 0;$$

$$\bar{\rho}_2^* = \bar{\rho}(1, \tau) \text{ при } \bar{\omega}(1, \tau) > 0; \quad (17)$$

$$\eta d\bar{G} / d\tau = (\bar{P}_2 - \bar{P}_1) + \bar{P}_{\text{нас}} - \bar{G}^2 / \bar{\gamma}. \quad (18)$$

Здесь  $\kappa = c_p / c_v$  – показатель адиабаты топлива;  $\alpha_1 = AN_{oc}H(\kappa - 1) / (c_0(0))^3$ ;  $\alpha_2 = \varepsilon \rho_0(0) / \beta$ ;  $\alpha_3 = l c_0(0) / \beta H$ ;  $\alpha_4 = L^2 / \beta H^2$ ;  $\alpha_r = \lambda H / 2D$ ;  $\theta = V_k / V$ ;  $\eta = (H_1 S) / (S_1 H)$ ;  $\bar{\gamma} = \gamma / (\rho_0(0) S^2)$ . (19)

Статические подогрев газа и потери давления в активной зоне определяются приближенными соотношениями  $(T_0(H) - T_0(0)) / T_0(0) \approx 2\alpha_1 / \pi M$ ;  $(P_0(0) - P_0(H)) / P_0(0) \approx \alpha_r M^2$ , где  $M = \omega_0(0) / c_0(0)$  – число Маха. Статическое значение  $\bar{G}$  равно  $\bar{G}_0 = G_0 / (c_0(0) \rho_0(0) S) = M$ .

Такой стационарный расход газа в контуре обеспечивается напором насоса, равным  $\bar{P}_{\text{нас}} = (1 - \bar{P}_0(1)) + M^2 / \bar{\gamma} \approx (\alpha_r + 1 / \bar{\gamma}) M^2$ . Величина  $M$  и параметры  $\alpha_i$ ,  $\alpha_r$  задаются, а соответствующие им точные значения  $\bar{\rho}_0(\xi)$ ,  $\bar{P}_0(\xi)$ ,  $\bar{T}_0(\xi)$ ,  $\bar{\omega}_0(\xi)$  вычисляются из статических уравнений.

Стационарная мощность реактора равна  $W_0 = (T_0(H) - T_0(0)) c_p G_0 \approx 2\alpha_1 T_0 c_p G_0 / \pi M$ . С ее ростом (с увеличением параметра  $\alpha_1$ ) в реакторе возникает акустическая неустойчивость. В области неустойчивости реализуются разнообразные импульсные периодические и стохастические режимы. Для их численного исследования в системе (11)–(18) отрезок  $\xi \in [0, 1]$  делился на достаточно большое число равноотстоящих узлов (расчеты в статье проведены для 50 узлов). Для аппроксимации уравнений (11)–(14) в этих узлах использовали разностные схемы, которые обеспечивали приемлемую точность расчетов, оставались устойчивыми при сильных и быстрых изменениях плотности нейтронов и смене знака скорости газа в каналах активной зоны. В случае схемы с полуоткрытым входом и выходом в алгоритме расчета предусмотрено, что в те моменты времени, в которые вычисленные значения скоростей на входе и выходе активной зоны оказываются меньше нуля ( $\omega(0, t) < 0$  или  $\omega(H, t) < 0$ ), этим скоростям присваиваются значения  $\omega(0, t) = 0$  или  $\omega(H, t) = 0$ .

### Хаотические колебания в реакторе с принудительной циркуляцией топливного газа

Рассмотрим реактор с параметрами  $P_0(0) = P_{10} = 10^6$  Па,  $\rho_0(0) = \rho_{10} = 100$  кг/м<sup>3</sup>,  $T_0(0) = T_{10} = T_0 = 423$  К,  $\varepsilon = 0.01$  м<sup>3</sup>/кг,  $\beta = 0.0075$  ( $\alpha_2 = 133$ ),  $c_0(0) = 100$  м/с,  $\omega_0(0) = 10$  м/с ( $M = 0.1$ ),  $l = 10^{-4}$  с,  $H = H_1 = 2$  м ( $\alpha_3 = 0.66$ ),  $L = 0.1$  м ( $\alpha_4 = 0.33$ ),  $c_p = 0.36$  кДж/(кг·К) ( $\kappa = 1.065$ ),  $S = S_1 = 1$  м<sup>2</sup> ( $\eta = 1$ ),  $V_k = 2V = 4$  м<sup>3</sup> ( $\theta = 2$ ),  $\alpha_r = 2$ ,  $\bar{\gamma} = 0.16$  ( $\bar{P}_{\text{нас}} \approx 0.0825$ ).

В этом случае  $T_0(H) - T_0(0) \approx 2694\alpha_1$  К и  $W_0 \approx 970\alpha_1$  МВт. Стационарный режим устойчив при  $\alpha_1 < 0.02$ . Периодические режимы реализуются при  $\alpha_1 \in [0.02, 0.08]$ , а хаотические – при  $\alpha_1 > 0.08$ . На рис. 2 показаны хаотические колебания переменных  $\ln \bar{N}(0.5, \tau)$ ,  $\bar{T}(1, \tau)$ ,  $\bar{G}(\tau)$ ,  $\bar{\omega}(1, \tau)$  системы (1)–(20) при  $\alpha_1 = 0.09$ . Время  $t$ , отвечающее значению  $\tau = 50$ , составляет одну секунду. Мощность  $W^*$  в периодических и стохастических режимах равна

$$W^* = \left\{ \int_0^{t_0} [T(H, t) - T_0] c_p \rho(H, t) \omega(H, t) S \times \right. \\ \left. \times \Psi(t) dt \right\} / t_0; \quad (21)$$

$\Psi(t) = 1$  при  $\omega(H, t) > 0$ ;  $\Psi(t) = 0$  при  $\omega(H, t) < 0$ . Здесь  $t_0$  – достаточно большое время. Для режима на рис. 2 ( $\alpha_1 = 0.09$ ) имеем  $W^* / W_0 = 2.7$  ( $W^* \approx 236$  МВт), т.е. мощность реактора в хаотическом режиме в 2.7 раза превышает мощность соответствующего ему неустойчивого стационарного режима. В случае традиционных устойчивых режимов ( $\alpha_1 < 0.02$ ) мощность реактора не превысит 20 МВт. В периодических режимах при  $\alpha_1 = 0.03, 0.05, 0.07$  получается  $W^* / W_0 = 1.4, 2.1, 3.3$ .

Из рис. 2г видно, что в процессе колебаний скорость газа на выходе реактора меняет знак. Однако хаотические режимы реализуются и в случае полуоткрытого входа и выхода. Это случай, когда вход 6 на рис. 1 открыт для поступления газа в активную зону из камеры 4 и закрыт для обратной циркуляции газа из реактора 1 в камеру 4, а вход 7 открыт для поступления газа из активной зоны в камеру 5 и закрыт для обратной циркуляции. Динамика реактора с полуоткрытым входом и выходом существенно отличается от динамики реактора с открытым входом и выходом. В реакторе с полуоткрытым входом, выходом и параметрами (20) периодические режимы наблюдаются при  $\alpha_1 \in [0.02, 0.035]$  и  $\alpha_1 \in [0.085, 0.12]$ , а хаотические режимы – при  $\alpha_1 \in [0.035, 0.085]$  и  $\alpha_1 \in [0.12, 0.17]$ . Хаотические колебания переменных при  $\alpha_1 =$

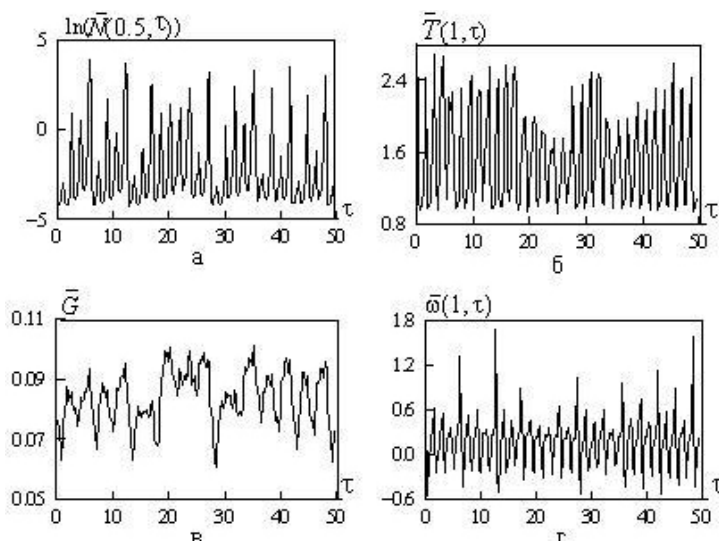


Рис. 2. Хаотические колебания в системе (1)–(20) в случае открытого входа и выхода активной зоны: колебания плотности нейтронов (а), температуры газа на выходе активной зоны (б), расхода газа на участке, соединяющем камеры (в), скорости газа на выходе реактора (г)

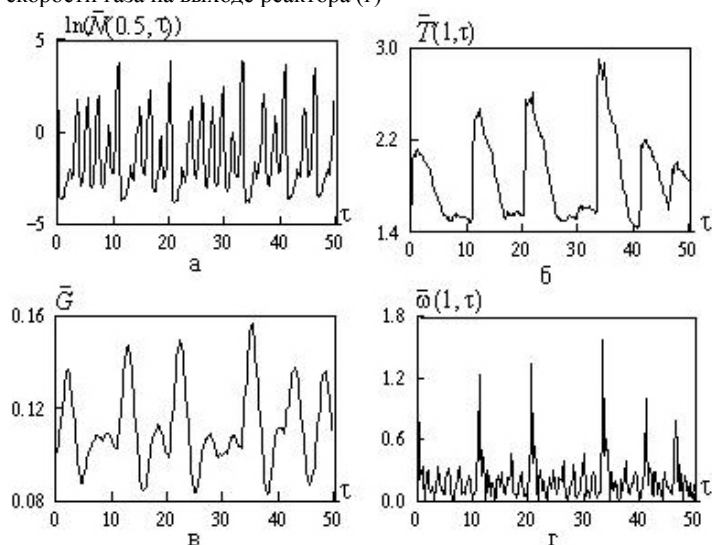


Рис. 3. Хаотические колебания в системе (1)–(20) в случае полукрытого входа и выхода активной зоны: колебания плотности нейтронов (а), температуры газа на выходе активной зоны (б), расхода газа на участке, соединяющем камеры (в), скорости газа на выходе реактора (г)

= 0.08 показаны на рис. 3. Полуоткрытый характер выхода активной зоны иллюстрирует зависимость  $\bar{\omega}(1, \tau)$  на рис. 3г. И в этом случае мощность реактора в периодических и стохастических режимах существенно превышает мощность устойчивых и неустойчивых стационарных режимов. При  $\alpha_1 = 0.03, 0.05, 0.08, 0.09, 0.11, 0.13, 0.15$  получаются значения  $W^*/W_0 = 1.3, 1.8, 2.3, 3.1, 3.3, 4.3, 3.1$ .

**Хаотические колебания в реакторе с неподвижным газообразным топливом**

В реакторе с принудительной циркуляцией топлива его стационарная мощность обеспечивается подогревом газа в активной зоне и отводом тепла путем циркуляции газа через тепло-

обменник, осуществляемой насосом. Однако можно обеспечить стационарную мощность и без насоса – в реакторе с неподвижным газообразным топливом. В таком реакторе теплосъем осуществляется через стенки каналов путем конвективного теплообмена со средой низкой температуры. Динамика реактора в этом случае описывается уравнениями (1)–(19), в которые вносятся следующие изменения:

$$\begin{aligned}
 Q &= A(N\rho - N_0\rho_0); AN_0\rho_0 - \text{отбираемая стационарная мощность}; P_{\text{нас}} = 0; G_0 = 0; \\
 \rho_0(x) &= \rho_{10} = \rho_{20} = \rho_0(0); P_0(x) = P_{10} = P_{20} = P_0(0); \\
 T_0(x) &= T_1 = T_2 = T_0; \omega_0(x) = 0 \text{ при } x \in [0, H]; \\
 \bar{\rho}_0(\xi) &= \bar{P}_0(\xi) = \bar{T}_0(\xi) = 1; \\
 \bar{\omega}_0(\xi) &= 0 \text{ при } \xi \in [0, 1]; \\
 \bar{G}_0 &= 0; \bar{P}_{\text{нас}} = 0; \bar{Q} = \alpha_1[\bar{N}\bar{\rho} - \bar{N}_0(\xi)]; \quad (22)
 \end{aligned}$$

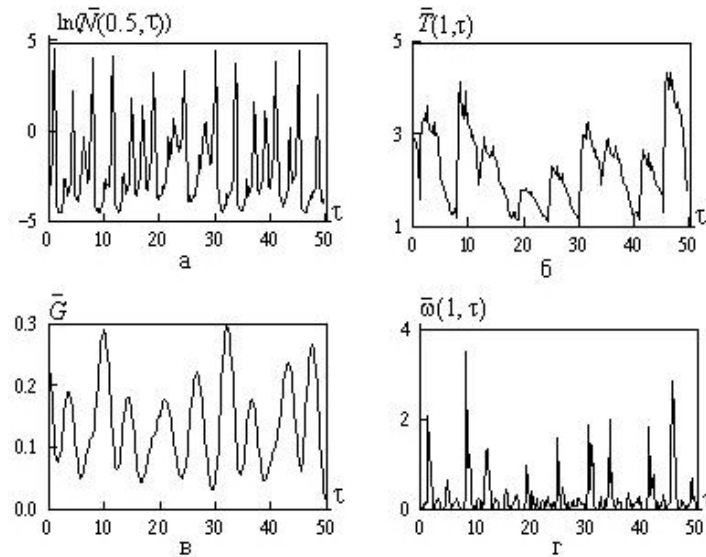


Рис. 4. Хаотические колебания в системе (1)–(20), (22) (вход и выход активной зоны полуоткрыты): а) – изменение плотности нейтронов; б) – изменение температуры газа на выходе активной зоны; в) – изменение расхода газа на участке между камерами; г) – изменение скорости газа на выходе реактора

$$\bar{N}_0(\xi) = \sin \pi \xi; \alpha_1 = \bar{A} N_{0c} \rho_0(0) H / P_0(0) c_0(0);$$

$$\bar{A} = AR/c_v; \bar{A} N_{0c} \rho_0(0) = W_0/V$$

– мощность на единицу объема топлива;  $W_0 = \alpha_1 P_0(0) c_0(0) S$ .

В таком реакторе при увеличении стационарной мощности  $W_0$  (увеличении параметра  $\alpha_1$ ) возбуждаются импульсные стохастические режимы. В этих режимах циркуляция газа по контуру (движение нагретого газа через теплообменники и отвод тепла) осуществляется исключительно за счет механических колебаний топливного газа, сопровождающих нейтронные импульсы. При этом в реакторе вырабатывается дополнительная мощность  $W^*$  (вычисляемая по формуле (21)), которая может многократно (в десятки раз) превосходить стационарную мощность  $W_0$ . Отбор тепла от стенок каналов активной зоны служит в этом случае лишь способом возбудить стохастический режим, основная мощность которого получается за счет отбора тепла в теплообменниках, вынесенных за пределы активной зоны.

В реакторе с полуоткрытым входом и выходом активной зоны и параметрами (20),  $\bar{\gamma} = 1$ ,  $\bar{P}_{нас} = 0$ ,  $\omega_0(0) = 0$  стационарный режим (22) устойчив, если  $\alpha_1 < 0.005$ . При  $\alpha_1 \in [0.005, 0.03]$  в реакторе реализуются периодические, а при  $\alpha_1 \in [0.035, 0.3]$  – стохастические режимы. Хаотические колебания переменных при  $\alpha_1 = 0.12$  показаны на рис. 4. Возникающую в отсутствие насоса циркуляцию газа по контуру иллюстрируют зависимости  $\bar{G}(\tau)$ ,  $\bar{\omega}(1, \tau)$  на рис. 4в и рис. 4г. Для хаотического режима на рис. 4 имеем  $W^*/W_0 = 26$  ( $W_0 \approx 100\alpha_1 = 12$  МВт,  $W^* \approx 312$

МВт). При  $\alpha_1 = 0.04, 0.08, 0.16, 0.22, 0.3$  получаются значения  $W^*/W_0 = 4.5, 12, 22, 28, 35$ .

В реакторе с открытым входом и выходом активной зоны реализуются режимы, в процессе которых расход газа на участке 9 меняет знак. Они могут возникать при малых значениях  $\bar{\gamma}$ .

При  $\bar{\gamma} \rightarrow 0$  имеем случай  $\bar{G}(\tau) \equiv 0$ , когда вход участка 9 закрыты или же он просто отсутствует. Хаотические колебания переменных в этом случае для реактора с параметрами (20) при  $\alpha_1 = 0.07$  показаны на рис. 5. В плоскости  $(\gamma_{n+1}, \gamma_n)$  на рис. 5г нанесены последовательные пары максимумов функции  $\bar{T}(0.5, \tau)$ , которые реализуются при  $\tau \in [0, 20000]$ . Точки заполняют кривые, определяющие одномерное точечное отображение. Его вид и свойства доказывают стохастичность колебаний. Для этого режима  $W^*/W_0 = 10$  ( $W^* \approx 70$  МВт).

### Заключение

Предложены схемы реакторов с газообразным ядерным топливом, в которых можно реализовать импульсные стохастические режимы. Рассмотрен замкнутый контур циркуляции топливного газа, включающий активную зону, нижнюю и верхнюю смесительные камеры, с расположенными в них теплообменниками, и участок, соединяющий верхнюю и нижнюю камеры. Рассмотрен реактор с циркулирующим топливом, в котором тепло, выделяемое в активной зоне, отводится с помощью принудительной циркуляции газа, осуществляемой насосом. Рассмотрен реактор с неподвижным (в статике) топливом, в котором отвод тепла от

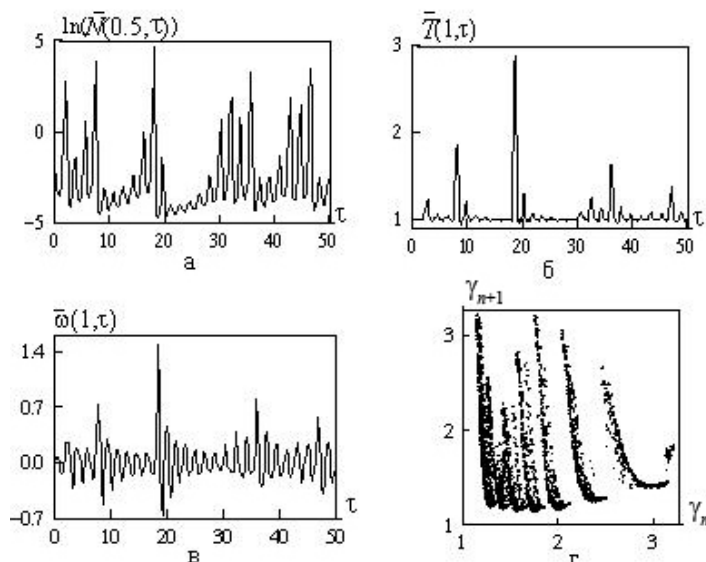


Рис. 5. Хаотические колебания в системе (1)–(20), (22) (вход и выход активной зоны открыты): а) – изменение плотности нейтронов; б) – изменение температуры газа на выходе активной зоны; в) – изменение скорости газа на выходе реактора; г) – отображение, определяющее хаотические колебания

нагреваемого в активной зоне газа осуществляется через стенки каналов активной зоны путем конвективного теплообмена со средой низкой температуры. Рассмотрен случай открытого входа и выхода активной зоны, когда газ может поступать как из активной зоны в обе камеры, так и из камер в активную зону. Рассмотрен случай с полуоткрытым входом и выходом, когда вход активной зоны открыт для поступления в нее газа из нижней камеры и закрыт для обратной циркуляции газа, а выход активной зоны открыт для поступления из нее газа в верхнюю камеру и закрыт для обратной циркуляции газа.

Показано, во всех рассмотренных случаях увеличение стационарной мощности приводит к акустической неустойчивости реактора, а в области неустойчивости реализуются импульсные стохастические режимы.

Проведен расчет мощности реактора в стохастических режимах. Исследована зависимость этой мощности от параметров реактора, и проведено ее сравнение со стационарной мощностью реактора. Показано, что мощность стохастического режима работы реактора может значительно превышать мощность возможных в реакторе устойчивых стационарных режимов и мощность того неустойчивого стационарного режима, из которого развивается режим импульсного хаоса. Особенно большая разница между динамической и статической мощностью получается в реакторах с неподвижным топливом. В таком реакторе отбор тепла от стенок каналов активной зоны служит лишь способом возбудить стохастический режим, основная мощность которого получается за счет отбора тепла в теплообменнике, вынесенном за преде-

лы активной зоны. Таким образом, за счет реализации импульсных стохастических режимов можно существенно увеличить мощность реакторов с газообразным топливом.

Нейтронные импульсы, реализующиеся в стохастическом режиме, сопровождаются колебаниями скорости, давления, плотности топливного газа. Показано, что исключительно за счет этих колебаний (без насосов) осуществляется циркуляция газа по контуру (движение газа через теплообменник) в реакторе, в котором стационарная мощность обеспечивается за счет отвода тепла от стенок каналов активной зоны, входы и выходы которой полуоткрыты.

*Работа поддержана грантом РФФИ (проект 11-08-97006-р\_поволжье\_a).*

#### Список литературы

1. Раевский И.И., Смирнов Ю.В. Реакторы на газообразном топливе // Атомная техника за рубежом. 1983. № 2. С. 8–12.
2. Постников Н.С. Стохастичность акустических автоколебаний в ядерных реакторах с газообразным циркулирующим топливом // Атомная энергия. 1997. Т.83. Вып. 1. С. 60–66.
3. Постников Н.С. Возможность, допустимость и целесообразность реализации импульсных стохастических режимов в реакторах с газообразным ядерным топливом // Атомная энергия. 2003. Т. 95. Вып. 5. С. 330–338.
4. Постников Н.С. Управление импульсными стохастическими режимами в реакторах с газообразным ядерным топливом // Вестник Нижегородского государственного университета. Математическое моделирование и оптимальное управление. Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2006. Вып. 3. С. 94–109.

**PULSED CHAOS IN GASEOUS-FUEL NUCLEAR REACTORS***N.S. Postnikov*

Pulsed stochastic regimes have been found to increase considerably the power of the gaseous-fuel nuclear reactors. We present the schemes of reactors which provide the gaseous fuel circulation through the core solely due to mechanical vibrations of the gas accompanying the neutron pulses.

*Keywords:* nuclear reactor, gaseous fuel, neutron pulse, dynamic chaos.