

## УДК 614.8

*Абрамов Ю.А., д-р техн. наук, гл. науч. сотр.,  
Кривцова В.И., д-р техн. наук, проректор,  
Левтеров А.А., канд. техн. наук, вед. науч. сотр.,  
Ключка Ю.П., ад'юнкт*

*Академия гражданской защиты Украины*

### **АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ГЕНЕРАТОРЕ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ ОБРАТИМЫХ ГИДРИДОВ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ**

Для газогенераторов на основе обратимых гидридов интерметаллидов предложена математическая модель, в основе которой лежит использование законов сохранения массы и энергии. Получены динамические характеристики газогенератора в виде передаточных функций

**Постановка проблемы.** Эксплуатация систем хранения и подачи (СХП) водорода на основе обратимых гидридов интерметаллидов сдерживается отсутствием сведений о пожаровзрывоопасности таких систем. Несмотря на многочисленные работы, посвященные использованию водорода, на сегодняшний день не решен целый комплекс задач, связанных с особенностями генерации водорода как в штатном режиме, так и в аварийном.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время известны публикации, посвященные процессам генерации водорода системами данного типа применительно к штатным режимам работы [1]. В то же время, отсутствуют сведения, характеризующие поведение систем хранения на основе обратимых гидридов интерметаллидов в аварийных режимах.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является изучение процессов генерации водорода в аварийных режимах, в частности, при разгерметизации генератора, резком повышении температуры и давления в нем и т.д. В генераторе водорода данного типа в процессе работы как в стационарном режиме, так и в аварийном режиме, могут изменяться такие параметры, как давление водорода, температура, концентрация водорода в интерметаллиде, количество подводимого тепла. При этом, изменение входных параметров генератора водорода может повлечь за собой изменение выходных параметров газогенератора, таких как температура выделяемого водорода и его давление.

Для описания режима работы генератора водорода можно воспользоваться методом «нульмерной» баллистики [2, 3]. В этом случае возможен эквивалентный переход от математического описания процессов в генераторе водорода с распределенными параметрами к построению матема-

тических моделей с сосредоточенными параметрами, которые строятся для усредненных по объему газодинамических характеристик.

При использовании этого метода, для квазипостоянного состава продуктов реакции газогенерации, в соответствии с законами сохранения массы и энергии, в первом приближении можно записать [4, 5]

$$\begin{cases} V \frac{dP}{dt} = kRT_* \chi S \rho U - k \sqrt{RT} \mu A_k P F; \\ \rho V \frac{dT}{dt} = (k \chi T_* - T) \rho S U - (k - 1) \mu A_k P F \frac{T}{\sqrt{RT}}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $P, T$  – соответственно усредненные по объему давление и температура газовой фазы в генераторе;  $U$  – усредненная по объему скорость газогенерации;  $V$  – свободный объем полости газогенератора;  $k$  – показатель адиабаты;  $R$  – газовая постоянная;  $T_*$  – средняя температура в зоне реакции на границе раздела фаз;  $\chi$  – средний по объему и времени коэффициент тепловых потерь в полости газогенератора;  $S$  – площадь поверхности газовыделения;  $\mu$  – коэффициент расхода через выходное отверстие;  $F$  – площадь поперечного сечения выходного отверстия;  $\rho$  – плотность генерируемого газа;  $A_k$  – функция показателя изоэнтропы

$$A_k = \sqrt{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}. \quad (2)$$

Систему уравнений (1) необходимо дополнить уравнением состояния газа в усредненных величинах, т.е.

$$P = \rho R T, \quad (3)$$

а также уравнением, которое характеризует закон газовыделения, т.е.  $U = U(P, T)$ .

На основании исследования режимов работы металлгидридного генератора [2] определено, что скорость генерирования водорода определяется разностью температур гидрида интерметаллида и источника или стока тепла. Скорость генерации водорода из обратимых гидридов интерметаллидов описывается следующим выражением

$$U = \beta(T - T_2), \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности, величина которого лежит в диапазоне  $(10^{-8} - 10^{-6})$  м/(с.К) [6];  $T_r$  – температура газогенерации, К.

Таким образом, система уравнений (1) и соотношения (3), (4) представляет собой математическое описание процесса генерации водорода.

Линеаризуем систему уравнений (1) путем разложения в ряд Тейлора относительно квазистационарного режима работы и ограничимся первыми членами ряда [2]:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_0 \frac{d\delta P}{dt} = kRT_* \rho_0 S \chi \delta U - (k\mu A_k P_0 \sqrt{RT_0}) \delta F - \\ - (k\mu A_k F_0 \sqrt{RT_0}) \delta P - 0,5k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{R/T_0} \delta T; \\ V_0 \rho \frac{d\delta T}{dt} = (k\chi T_* - T_0) \rho S \delta U - \rho S U_0 \delta T - (k-1)\mu A F_0 \sqrt{\frac{T_0}{R}} \delta P - \\ - 0,5(k-1)\mu A_k P_0 \sqrt{\frac{T_0}{R}} \delta F - (k-1)\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{\frac{1}{T_0 R}} \delta T. \end{array} \right. \quad (5)$$

Введем обозначения:

$$\Delta P = \frac{\delta P}{P_0}; \quad \Delta U = \frac{\delta U}{U_0}; \quad \Delta F = \frac{\delta F}{F_0}; \quad \Delta T = \frac{\delta T}{T_0}, \quad (6)$$

где индекс «0» относится к квазистационарному состоянию и учтем, что имеет место зависимость  $U = U(T, T_r)$ . Тогда можно записать

$$\delta U = \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 \delta T + \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \delta T_r. \quad (7)$$

По аналогии с (6), выражение (7) трансформируется к следующему виду:

$$\Delta U = \frac{T_0}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 \Delta T + \frac{T_{r0}}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \Delta T_r. \quad (8)$$

С учетом выражения (6) и (8) система уравнений (5) может быть сведена к системе из 2-х уравнений.

$$\left\{ \begin{aligned} V_0 P_0 \frac{d\Delta P}{dt} &= kRT_* \rho_0 S \chi U_0 \left( \frac{T_0}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 \Delta T + \frac{T_{r0}}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \Delta T_r \right) - \\ &- (k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{RT_0}) \Delta F - (k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{RT_0}) \Delta P - 0,5k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{RT_0} \Delta T; \\ V_0 P_0 \frac{dT}{dt} &= (k\chi T_* - T_0) \rho SRU_0 \left( \frac{T_0}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 \Delta T + \frac{T_{r0}}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \Delta T_r \right) - \\ &- \rho SU_0 T_0 R \Delta T - (k-1) \mu A P_0 F_0 R \sqrt{\frac{T_0}{R}} \Delta P - 0,5(k-1) \mu A_k P_0 F_0 R \sqrt{\frac{T_0}{R}} \Delta F - \\ &- (k-1) \mu A_k P_0 F_0 R \sqrt{\frac{T_0}{R}} \Delta T, \end{aligned} \right. \quad (9)$$

Здесь во втором уравнении учтено соотношение (3), а само уравнение предварительно увеличено слева и справа на постоянную R.

Перепишем систему (9) в следующей форме:

$$\left\{ \begin{aligned} V_0 P_0 \frac{d\Delta P}{dt} + (k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{RT_0}) \Delta P &= k\sqrt{RT_0} \left( \rho_0 S \chi T_* \sqrt{RT_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 - 0,5\mu A_k P_0 F_0 \right) \Delta T - \\ &- (k\mu A_k P_0 F_0 \sqrt{RT_0}) \Delta F + k\rho_0 \chi S R T_* T_{r0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \Delta T_r; \\ P_0 V_0 \frac{dT}{dt} + [(0,5(k-1)\mu A_k P F \sqrt{RT})_0 + (\rho S R T U)_0 - \\ &- ((k\rho S \chi R T_* U)_0 - (\rho S R T U)_0) \frac{T_0}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0] \Delta T = \\ &= [(k\rho S \chi R T_* U)_0 - (\rho S R T U)_0] \frac{T_{r0}}{U_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_r} \right)_0 \Delta T_r - \\ &- ((k-1)\mu A_k P F \sqrt{RT})_0 \Delta P - ((k-1)\mu A_k P F \sqrt{RT})_0 \Delta F. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Эта система уравнений может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{cases} \tau_{1P} \frac{d\Delta P}{dt} + \Delta P = K_{1T} \Delta T - \Delta F + K_{2T} \Delta T_{\Gamma}; \\ \tau_{1T} \frac{d\Delta T}{dt} + \Delta T = -K_{1P} \Delta P - K_{1F} \Delta F + K_{3T} \Delta T_{\Gamma}, \end{cases} \quad (11)$$

где учтены следующие обозначения:

$$\dot{m}_0 = \frac{\mu A_k P_0 F_0}{\sqrt{RT_0}}; \quad (12)$$

$$\tau_0 = \frac{V_0 P_0}{\dot{m}_0 RT_0}; \quad (13)$$

$$\tau_{1P} = \frac{\tau_0}{k}; \quad (14)$$

$$K_{1T} = \frac{\rho_0 S T_0}{\dot{m}_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 - 0,5; \quad (15)$$

$$K_{2T} = \frac{\rho_0 S T_{\Gamma 0}}{\dot{m}_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_{\Gamma}} \right)_0; \quad (16)$$

$$\xi_1 = \left[ 0,5(k-1) + \frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} - \frac{(k-1)\rho S T_0}{\dot{m}_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T} \right)_0 \right]^{-1}; \quad (17)$$

$$K_{3T} = (k-1) \frac{\rho S T_{\Gamma 0}}{\dot{m}_0} \left( \frac{\partial U}{\partial T_{\Gamma}} \right)_0 \xi_1; \quad (18)$$

$$K_{1P} = K_{1F} = (k - 1)\xi_1; \quad (19)$$

$$T_0 = T_*\chi; \quad (20)$$

$$\tau_{1T} = \tau_0\xi_1. \quad (21)$$

С целью определения характера изменения температуры в газогенераторе как выходного параметра СХП в зависимости от входных параметров (площадь выходного сечения, температура газогенерации), продифференцируем по времени первое уравнение системы (11), затем подставим в него выражение для скорости изменения приращения температуры из второго уравнения системы (11), а для приращения температуры - из первого уравнения системы (11). Тогда окончательно получим математическую модель, описывающую изменение приращения температуры в газогенераторе относительно его квазистационарного режима работы:

$$\begin{aligned} & \tau_{1P}\tau_{1T}\Delta\ddot{T} + (\tau_{1P} + \tau_{1T})\Delta\dot{T} + (K_{1P}K_{1T} + 1)\Delta T = \\ & = \tau_{1P}K_{3T}\Delta\dot{T}_\Gamma - \tau_{1P}K_{1F}\Delta\dot{F} + (K_{1P} - K_{1F})\Delta F + (K_{3T} - K_{1P}K_{2T})\Delta T_\Gamma. \end{aligned} \quad (22)$$

Поскольку  $K_{1P} - K_{1F} = 0$  и  $K_{3T} - K_{1P}K_{2T} = 0$ , то выражение (22) примет следующий вид:

$$\tau_{1P}\tau_{1T}\Delta\ddot{T} + (\tau_{1P} + \tau_{1T})\Delta\dot{T} + (K_{1P}K_{1T} + 1)\Delta T = \tau_{1P}K_{3T}\Delta\dot{T}_\Gamma - \tau_{1P}K_{1F}\Delta\dot{F}. \quad (23)$$

В соответствии с критерием Гурвица должно выполняться условие:

$$K_{1P}K_{1T} + 1 > 0. \quad (24)$$

Рассмотрим случай, когда в качестве входного воздействия используется приращение температуры процесса газогенерации. Тогда передаточная функция газогенератора будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} W_1(S) &= \frac{\Delta T(S)}{\Delta T_\Gamma(S)} = \frac{\tau_{1P}K_{3T}S}{\tau_{1P}\tau_{1T}S^2 + (\tau_{1P} + \tau_{1T})S + K_{1P}K_{1T} + 1} = \\ &= \frac{\lambda_1 S}{\alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0} = \frac{\lambda_1}{\alpha_2} * \frac{S}{(S - S_1)(S - S_2)}, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\lambda_1 = \tau_{1P} K_{3T}; \quad \alpha_1 = \tau_{1P} + \tau_{1T}; \quad (26)$$

$$\alpha_2 = \tau_{1P} \tau_{1T}; \quad \alpha_0 = K_{1P} K_{1T} + 1;$$

$S_{1,2}$  - корни уравнения

$$\alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0 = 0. \quad (27)$$

С учетом обозначений (26) выражения для корней уравнения (27) могут быть записаны следующим образом:

$$S_{1,2} = \frac{-\alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2\alpha_0}}{2\alpha_2} = \frac{-(\tau_T + \tau_P) \pm \sqrt{(\tau_T + \tau_P)^2 - 4\tau_T\tau_P(K_{1T}K_{1P} + 1)}}{2\tau_T\tau_P}. \quad (28)$$

Тогда из физических соображений из выражения (28) вытекает:

$$(\tau_T + \tau_P)^2 \geq 4\tau_T\tau_P(K_{1T}K_{1P} + 1). \quad (29)$$

Перепишем выражение (29) следующим образом:

$$K_{1P}K_{1T} \leq 0,25 \left( \frac{\tau_T}{\tau_P} + \frac{\tau_P}{\tau_T} \right) - 0,5. \quad (30)$$

Тогда зависимость  $K_{1T}K_{1P} = f(\tau_T, \tau_P)$  совместно с (24) (см. рис. 1) определяет границу области допустимых значений параметров  $K_{1T}, K_{1P}, \tau_T, \tau_P$  газогенератора.

Рассмотрим случай, когда закон изменения температуры газогенерации имеет вид:

$$\Delta T_T(t) = A \cdot 1(t). \quad (31)$$

В этом выражении  $A = const$ ,  $1(t)$  - функция Хевисайда [7], т.е.

$$1(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } t \geq 0; \\ 0, & \text{если } t < 0. \end{cases}$$

Согласно [6], решение уравнения (23) при условии (31) можно записать в виде:

$$\Delta T(t) = L^{-1} \left( \frac{W_1(S)}{S} A \right) = \frac{A\lambda_1}{\alpha_2} \left( -\frac{S_1}{S_1(S_2 - S_1)} e^{S_1 t} - \frac{S_2}{S_2(S_1 - S_2)} e^{S_2 t} \right). \quad (32)$$

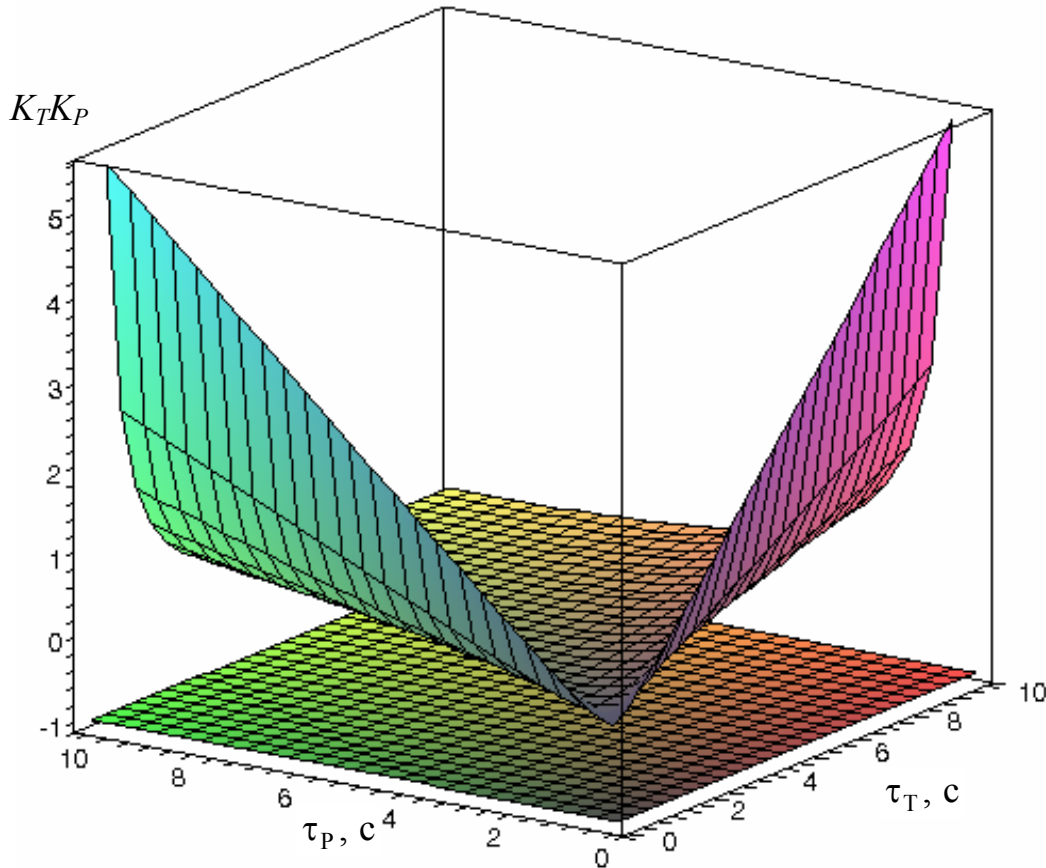


Рис. 1 – Область допустимых значений параметров газогенератора

Графическое изображение выражения (32) представлено на рис. 2, при этом использовались исходные данные, представленные в табл. 1. Также на этом же рисунке по вспомогательной шкале ординат приведена функция  $f_T$ , характеризующая выход системы на стационарный режим, которая определяется в соответствии с выражением:

$$f_T(t) = \frac{\Delta T(t) - \Delta T(t \rightarrow \infty)}{\Delta T(t \rightarrow \infty)} \cdot 100\%. \quad (33)$$

Из анализа рис. 2 следует, что изменение входного параметра  $\Delta T_r$  влечет за собой изменение выходного параметра  $\Delta T$  на величину, мень-



шую в 10000 раз. Также из этого рисунка следует, что для выхода на неизменный (стационарный) режим генерации водорода, при котором отклонение выходного параметра составляет не более 5%, системе необходимо 0,75 с. В качестве исходных данных использовались значения параметров, которые наиболее часто упоминались в литературе для систем данного типа.

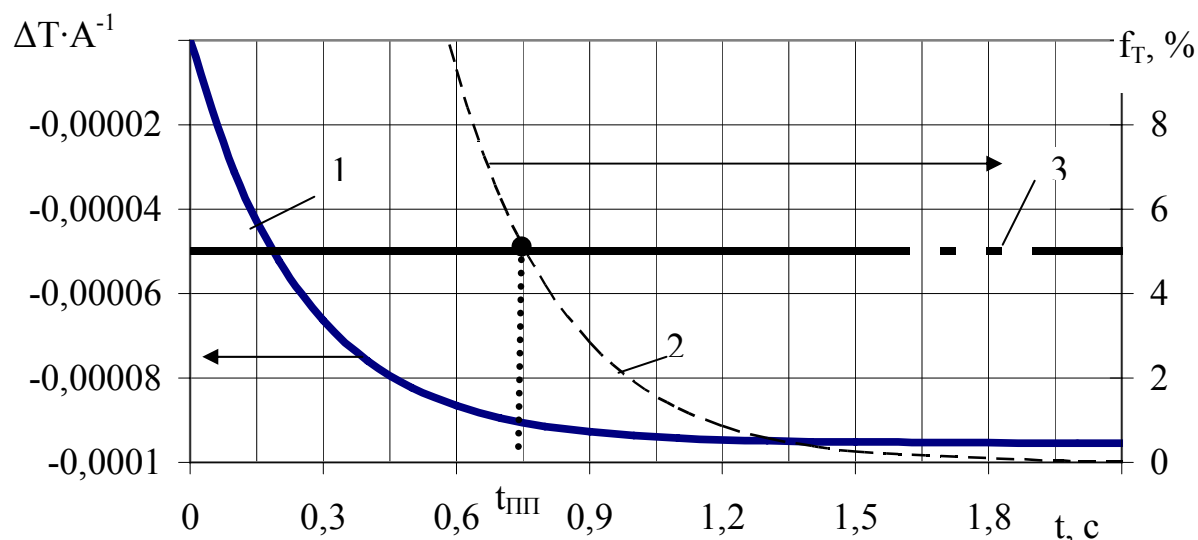


Рис. 2 – Зависимость изменения относительной температуры от времени, если в качестве входного изменяемого параметра используется  $T_r$ : 1 – изменение относительной температуры; 2 – относительное отклонение от стационарного режима генерации; 3 - прямая, которая соответствует значению  $f_T=5\%$

Таблица 1 – Исходные значения параметров системы

Параметр	Величина
$\dot{m}_0, \text{ кг/с}$	0,05
$S, \text{ м}^2$	0,5 м <sup>2</sup>
$T_{r0}, \text{ К}$	387
$\beta, \text{ м/(с·К)}$	1·10 <sup>-6</sup>
$P_0, \text{ МПа}$	2, 7
$F_0, \text{ м}^2$	0,0001
$T_0, \text{ К}$	395
$\mu$	0,5

Если в аварийной ситуации в генераторе водорода изменяется площадь выходного сечения газогенератора, например резкое открытие клапана, появление дополнительного аварийного отверстия, то передаточная функция газогенератора имеет вид:

$$W_2(S) = \frac{\Delta T(S)}{\Delta F(S)} = \frac{\mu_1 S}{\alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0} = \frac{\mu_1}{\alpha_2} * \frac{S}{(S - S_1)(S - S_2)}, \quad (34)$$

где

$$\mu_1 = -\tau_{1P} K_{1F}. \quad (35)$$

Если закон изменения площади выходного сечения газогенератора описывается выражением

$$\Delta F_T(t) = B \cdot 1(t); \quad B = const,$$

то приращение температуры водорода в газогенераторе будет иметь вид

$$\Delta T(t) = L^{-1} \left( \frac{W_2(S)}{S} B \right) = \frac{B \mu_1}{\alpha_2} \left( -\frac{S_1}{S_1(S_2 - S_1)} e^{S_1 t} - \frac{S_2}{S_2(S_1 - S_2)} e^{S_2 t} \right). \quad (36)$$

На рис. 3 представлена зависимость изменения относительной температуры выделяемого водорода от времени, построенная в соответствии с исходными данными табл. 1, с помощью выражения (36) и аналогичного выражения (33).

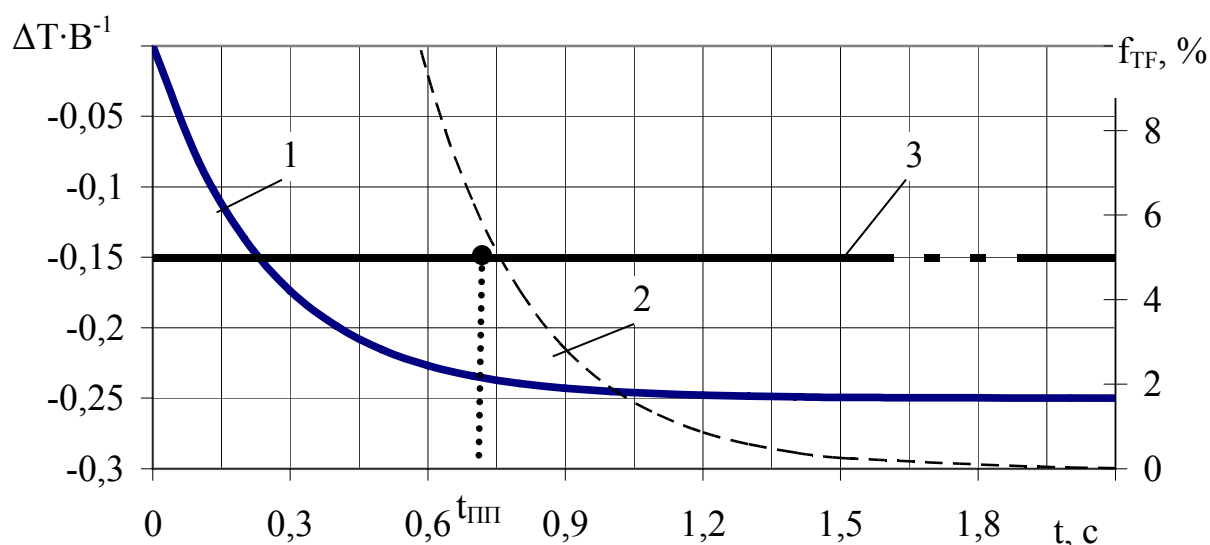


Рис. 3 – Зависимость изменения относительной температуры от времени, если в качестве входного изменяемого параметра используется F: 1 – изменение относительной температуры; 2 – относительное отклонение от стационарного режима генерации; 3 – прямая, которая соответствует значению  $f_{TF}=5\%$

Из анализа рис. 3 следует, что изменение входного параметра  $\Delta F$  влечет за собой изменение выходного параметра  $\Delta T$  на значение, меньшее в 3 раза.

Характер изменения давления в газогенераторе как выходного параметра СХП в зависимости от входных параметров получен аналогично выражению (22). Для этого продифференцируем по времени второе уравнение системы (11). Затем подставим в него выражение для скорости изменения приращения давления из первого уравнения системы (11), а для приращения давления - из второго уравнения системы (11). В результате получим математическую модель, описывающую изменение приращения давления в газогенераторе относительно его квазистационарного режима работы:

$$\begin{aligned} \tau_{1P}\tau_{1T}\Delta\ddot{P} + (\tau_{1P} + \tau_{1T})\Delta\dot{P} + (K_{1P}K_{1T} + 1)\Delta P = \\ = \tau_{1T}K_{2T}\Delta\dot{T}_G - \tau_{1T}\Delta\dot{F} - (K_{1F}K_{1T} + 1)\Delta F + (K_{3T}K_{1T} + K_{2T})\Delta T_G. \end{aligned} \quad (37)$$

Если в качестве входного воздействия используется приращение температуры процесса газогенерации, то передаточную функцию газогенератора можно записать в виде

$$\begin{aligned} W_3(S) = \frac{\Delta P(S)}{\Delta T_G(S)} = \frac{K_{2T}\tau_{1T}S + K_{3T}K_{1T} + K_{2T}}{\tau_{1P}\tau_{1T}S^2 + (\tau_{1P} + \tau_{1T})S + K_{1P}K_{1T} + 1} = \\ = \frac{\nu_1 S + \nu_0}{\alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0} = \frac{\nu_1}{\alpha_2} * \frac{S + \nu_*}{(S - S_1)(S - S_2)}. \end{aligned} \quad (38)$$

В том случае, если закон изменения температуры газогенерации имеет вид

$$\Delta T_G(t) = M \cdot 1(t); \quad M = const, \quad (39)$$

то приращение давления водорода в газогенераторе в динамическом режиме его работы, как решение уравнения (37), будет описываться выражением

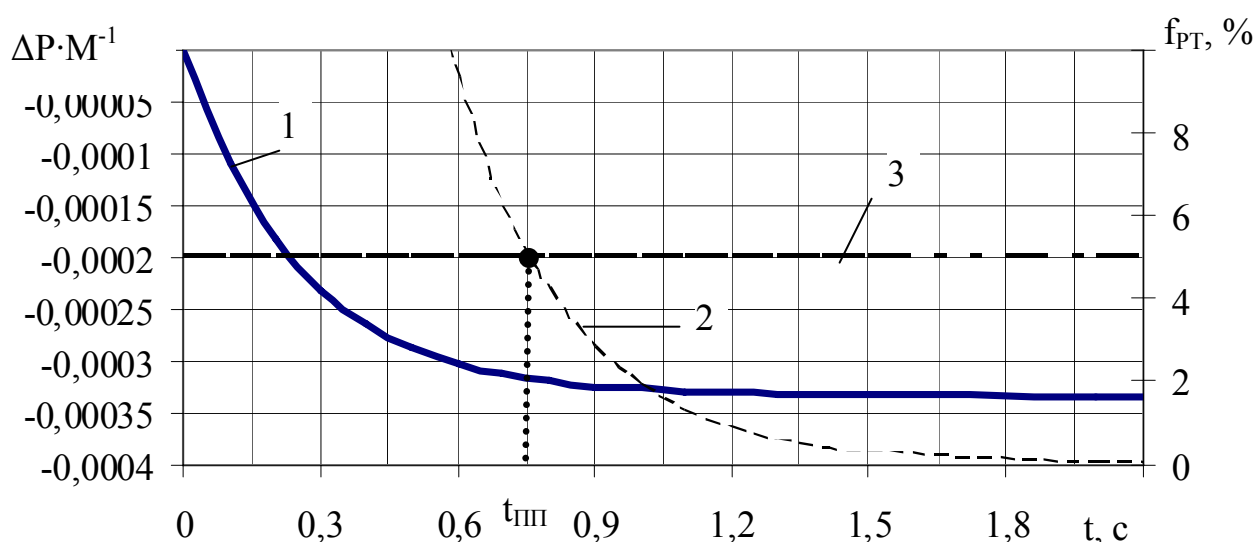
$$\Delta P(t) = L^{-1} \left( \frac{W_3(S)}{S} M \right) =$$

$$= \frac{M v_1}{\alpha_2} \left( \frac{v_*}{S_1 S_2} - \frac{S_1 + v_*}{S_1 (S_2 - S_1)} e^{S_1 t} - \frac{S_2 + v_*}{S_2 (S_1 - S_2)} e^{S_2 t} \right).$$
(40)

Здесь учтены следующие обозначения:

$$\lambda_* = v_0 / v_1; \quad v_0 = K_{3T} K_{1T} + K_{2T}; \quad v_1 = K_{2T} \tau_{1T}.$$
(41)

На рис. 4 представлена зависимость изменения относительного давления водорода от времени, построенная в соответствии с исходными данными табл. 1, с помощью выражения (40) и и аналогичного выражению (33).



**Рис. 4 – Зависимость изменения относительного давления от времени, если в качестве входного изменяемого параметра используется  $T_r$ : 1 – изменение относительного давления; 2 – относительное отклонение от стационарного режима генерации; 3 – прямая, которая соответствует значению  $f_{T_r}=5\%$**

Из анализа рис. 4 следует, что изменение входного параметра  $\Delta T_r$  влечет за собой изменение выходного параметра  $\Delta P$  на значение, меньшее в 2500 раз.

В том случае, когда в результате аварийной ситуации изменяется площадь выходного сечения газогенератора, его передаточная функция имеет вид

$$W_4(S) = \frac{\Delta T(S)}{\Delta F(S)} = \frac{m_1 S + m_0}{\alpha_2 S^2 + \alpha_1 S + \alpha_0} = \frac{m_1}{\alpha_2} * \frac{S + m_*}{(S - S_1)(S - S_2)}, \quad (42)$$

где

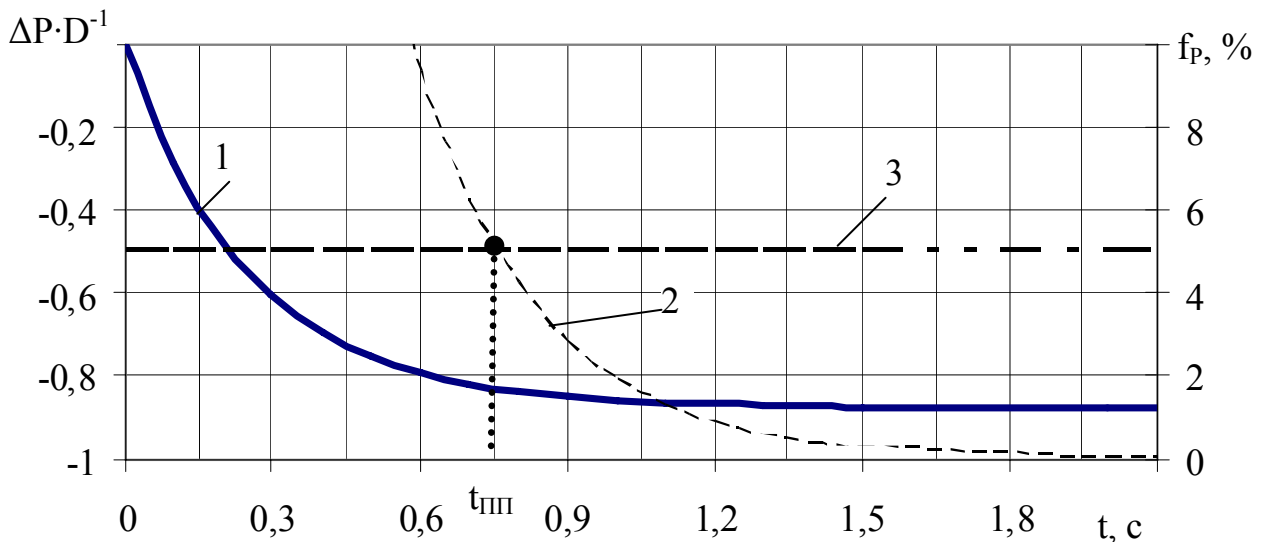
$$m_* = m_0 / m_1; \quad m_0 = -(K_{1F} K_{1T} + 1); \quad m_1 = -\tau_{1T}. \quad (43)$$

Если закон изменения площади выходного сечения газогенератора описывается выражением

$$\Delta F(t) = D \cdot 1(t); \quad D = const,$$

то приращение давления водорода в газогенераторе будет иметь вид

$$\begin{aligned} \Delta P(t) &= L^{-1} \left( \frac{W_4(S)}{S} D \right) = \\ &= \frac{D m_1}{\alpha_2} \left( \frac{m_*}{S_1 S_2} - \frac{S_1 + m_*}{S_1 (S_2 - S_1)} e^{S_1 t} - \frac{S_2 + m_*}{S_2 (S_1 - S_2)} e^{S_2 t} \right). \end{aligned} \quad (44)$$



**Рис. 5 – Зависимость изменения относительного давления от времени, если в качестве входного изменяемого параметра используется F: 1 – изменение относительного давления; 2 – относительное отклонение от стационарного режима генерации; 3 - прямая, которая соответствует значению  $f_p=5\%$**

Зависимость изменения давления получаемого водорода от времени, представленная на рис. 5, построена с помощью выражения (44) и аналогичного выражению (33).

Из рис. 5 следует, что изменение входного параметра  $\Delta F$  влечет за собой изменение выходного параметра  $\Delta P$  на значение, меньшее в 1,1 раза.

**Выводы:** В результате проведенной работы были получены следующие результаты:

1. Анализ рис. 2 ÷ рис. 5 показал, что время переходного процесса во всех четырех вариантах одинаково, при одних и тех же начальных условиях. В то же время, наибольшее изменение выходного параметра (давления) наблюдается при изменении площади выходного сечения.

2. Для расчета параметров газогенераторов на основе обратимых гидридов интерметаллидов предложена математическая модель, в основе которой лежит использование законов сохранения массы и энергии.

3. С использованием процедуры линеаризации получены выражения для передаточных функций и переходных характеристик газогенераторов на основе обратимых гидридов интерметаллидов. Произведена оценка устойчивости процессов генерации водорода и, с использованием критерия Гурвица, построены области допустимых значений параметров газогенератора.

4. Получены динамические характеристики газогенератора в виде передаточных функций и переходных характеристик для случая аварийной ситуации, когда процесс характеризуется изменением площади выходного сечения и изменением температуры газогенерации.

5. Показано, что в случае скачкообразного изменения величины выходного отверстия, изменение относительной температуры в газогенераторе может составить 25% от изменения относительной площади выходного сечения, а изменение относительного давления может составить около 80% от изменения относительной площади выходного сечения.

6. Показано, что изменение температуры газогенерации (в диапазоне до 30%) практически не влияет на выходные характеристики СХП, так как в случае скачкообразного изменения температуры генерации, изменение относительной температуры может составить около 0,01% от изменения относительной площади выходного сечения, а изменение относительного давления около 0,035%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В.И. Кривцова, Ю.А. Абрамов, К.Р. Умеренкова, Ю.П. Ключка. Определение пожаровзрывоопасных технологических параметров систем хранения и подачи водорода на основе обратимых гидридов интерме-

- таллидов // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: Фолио, 2004. – Вып. 16. – С. 104-115.
2. Системы хранения и подачи водорода на основе твердых веществ для бортовых энергетических установок / Ю.А. Абрамов, В.И. Кривцова, В.В. Соловей. – Харьков:2002. – 277 с.
  3. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика ствольных систем и пороховых ракет. – М.: Оборонгиз, 1962. - 602 с.
  4. Шишков А.А., Румянцев Б.В. Газогенераторы ракетных систем. – М.: Машиностроение, 1981. – 152 с.
  5. Присняков В.Ф. Динамика ракетных двигателей твердого топлива. Учебное пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1984. - 248 с.
  6. Черников А.С., Фадеев В.Н., Савин В.И. Гидридные материалы, как аккумуляторы водорода // Атомноводородная энергетика и технология. – 1982. – Вып.4. – С. 89 – 187.
  7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.

