

Ю.А. Абрамов, д.т.н., профессор, гл. науч. сотр., НУГЗУ,
В.Г. Борисенко, к.т.н., доцент, НУГЗУ,
В.И. Кривцова, д.т.н., профессор, НУГЗУ

О ВЫБОРЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СХП ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА

Определены условия, при которых осуществляется выбор параметров газогенератора СХП водорода.

Ключевые слова: газогенератор, пожаровзрывоопасность, условия выбора параметров.

Постановка проблемы. Одним из направлений, связанным с совершенствованием бортовых энергетических установок (БЭУ), является использование в них в качестве рабочего тела водорода. Хранение, получение и подача водорода в БЭУ осуществляется системой хранения и подачи (СХП), в частности, на основе твердых веществ, содержащих водород. Одной из проблем при реализации такого подхода является исключение пожаровзрывоопасных ситуаций на всех этапах функционирования СХП водорода.

Анализ последних исследований и публикаций. Решение задач анализа и синтеза применительно к системам хранения и подачи водорода на основе твердых веществ, учитывающих их пожаровзрывоопасные свойства, приведено в работе [1]. Дальнейшее развитие такого рода исследований получило в работах [2,3]. Во всех этих работах при рассмотрении динамических режимов функционирования СХП водорода определяются области существования допустимых значений для интегральных параметров. При решении инженерных задач, в частности, связанных с проектированием СХП водорода, возникает необходимость в определении областей существования для физических параметров таких систем и их функциональных элементов.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является определение областей допустимых значений физических параметров газогенератора СХП водорода на основе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС).

Одним из основных элементов СХП водорода на основе СВС является газогенератор. В переходном режиме работы такого газогенератора, который имеет место, например, при регулируемом расходе водорода, процессы, происходящие в нем, описываются дифференциальным уравнением [1]

$$\sum_{i=1}^2 a_i \frac{d^{(i)} \Delta T(t)}{dt^i} = \sum_{k=0}^1 b_k \frac{d^{(k)} \Delta F(t)}{dt^k}, \quad (1)$$

где $\Delta T(t)$ – относительное приращение температуры в полости газогенератора, обусловленное относительным изменением площади $\Delta F(t)$ его выходного отверстия; a_i, b_i – параметры.

Выражения для параметров модели (1) имеют вид (индекс «0» соответствует квазиустановившемуся режиму работы)

$$a_0 = \frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k-1}{2} \right)^{-1}; \quad (2)$$

$$a_1 = \frac{\tau_0}{k} \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k+1}{2} - \frac{\rho S P_0}{\dot{m}_0} \frac{\partial U}{\partial P} \Big|_0 \right) \times \left[\left(1 - \frac{\rho S P_0}{\dot{m}_0} \frac{\partial U}{\partial P} \Big|_0 \right) \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k-1}{2} \right) \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$a_2 = \frac{\tau_0^2}{k} \left[\left(1 - \frac{\rho S P_0}{\dot{m}_0} \frac{\partial U}{\partial P} \Big|_0 \right) \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k-1}{2} \right) \right]^{-1}; \quad (4)$$

$$b_0 = (k-1) \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k-1}{2} \right)^{-1}; \quad (5)$$

$$b_1 = -\frac{\tau_0}{k} (k-1) \left[\left(1 - \frac{\rho S P_0}{\dot{m}_0} \frac{\partial U}{\partial P} \Big|_0 \right) \left(\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + \frac{k-1}{2} \right) \right]^{-1}; \quad (6)$$

$$\tau_0 = \frac{P_0 V_0}{\dot{m}_0 R T_0}, \quad (7)$$

где ρ – плотность водорода; S – площадь поверхности газовыделения; \dot{m} – расход водорода; k – показатель адиабаты; U – усредненная по объему скорость генерации водорода, определяемая с помощью выражения

$$U = \sigma P^n, \quad n=0,1 \div 0,9, \quad \sigma = (10^{-3} \div 10^{-2}) \text{с} \cdot \text{м}^{-1}; \quad (8)$$

P – давление в газогенераторе; V – свободный объем полости газогенератора; T – температура водорода в полости газогенератора; R – газовая постоянная.

Для нормального процесса функционирования газогенератора СХП водорода необходимо, чтобы процесс генерации водорода был устойчивым, т.е. чтобы при изменении площади выходного отверстия газогенератора температура газа в его полости с течением времени стремилась к некоторому установившемуся значению. В противном случае будет иметь место либо рост температуры, что в итоге может привести к разрушению газогенератора, сопровождаемому возгоранием и взрывом, либо снижение температуры, что может повлечь за собой прекращение реакции СВС.

Для обеспечения устойчивого процесса генерации водорода в СХП необходимо и достаточно в соответствии с критерием Гурвица [4], чтобы имело место

$$a_i > 0, \quad i = \overline{0,2}; \quad (9)$$

С учетом (2)÷(4) условие (9) трансформируется к системе неравенств, в которых учтено, что $k=1,4$

$$\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} > 0,2; \quad (10)$$

$$\frac{\rho S P_0 \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_0}{\dot{m}_0} < 1,0; \quad (11)$$

$$\frac{\rho S U_0}{\dot{m}_0} + 1,2 > \frac{\rho S P_0 \left. \frac{\partial U}{\partial P} \right|_0}{\dot{m}_0}. \quad (12)$$

Неравенства (10)÷(12) имеют графическую интерпретацию, которая определяет область допустимых значений для параметров газогенератора, обеспечивающих пожаровзрывобезопасный процесс генерации водорода. На рис. 1 приведен пример такой области допустимых значений параметров газогенератора СХП водорода.

Если учесть выражение (8), то неравенства (10) и (11) трансформируются соответственно следующим образом

$$\frac{\rho S \sigma P_0^n}{\dot{m}_0} > 0,2; \quad (13)$$

$$\frac{\rho S \sigma n P_0^n}{\dot{m}_0} < 1,0, \quad (14)$$

которые можно представить в следующем виде

$$0,2 < \frac{\rho S \sigma P_0^n}{\dot{m}_0} < n^{-1}. \quad (15)$$



Рис. 1. Область допустимых значений параметров газогенератора СХП водорода

Графическая интерпретация (15) имеет вид, приведенный на рис. 2.

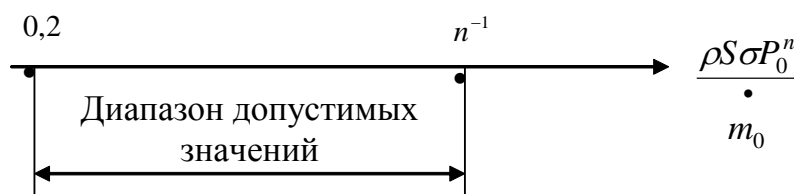


Рис. 2. Диапазон допустимых значений параметров газогенератора водорода

С учетом значений для ρ и σ неравенство (15) можно интерпретировать так, как это показано на рис. 3.

Если дифференциальное уравнение (1) переписать следующим образом

$$c^2 \frac{d^2 \Delta T(t)}{dt^2} + 2\xi c \frac{d\Delta T(t)}{dt} + \Delta T(t) = \sum_{k=0}^1 b_k \frac{d^{(k)} \Delta F(t)}{dt^k}, \quad (16)$$

где

$$c = (a_2 a_0^{-1})^{0,5}; \quad \xi = 0,5 a_1 (a_0 a_2)^{0,5}, \quad (17)$$

то в предположении, что величина перерегулирования не превышает 5,0%, должно быть выполнено условие [5]

$$\xi \geq 0,75. \quad (18)$$



Рис. 3. Область допустимых значений параметров газогенератора водорода

С учетом (17) условие (18) принимает вид

$$a_1^2 \geq 2,25a_0a_2. \tag{19}$$

На рис. 4 приведен фазовый портрет газогенератора водорода на основе СВС для $P_0 = 5,6$ МПа; $\dot{m}_0 = 4 \cdot 10^{-4}$ кг·с⁻¹; $V_0 = 0,1$ м³; $n = 0,5$; $\sigma = 5 \cdot 10^{-3}$ с·м⁻¹; $S = 6 \cdot 10^{-2}$ м². Фазовый портрет построен в масштабе $a_2(Ab_1)$, где A – величина относительного приращения площади выходного отверстия газогенератора водорода.

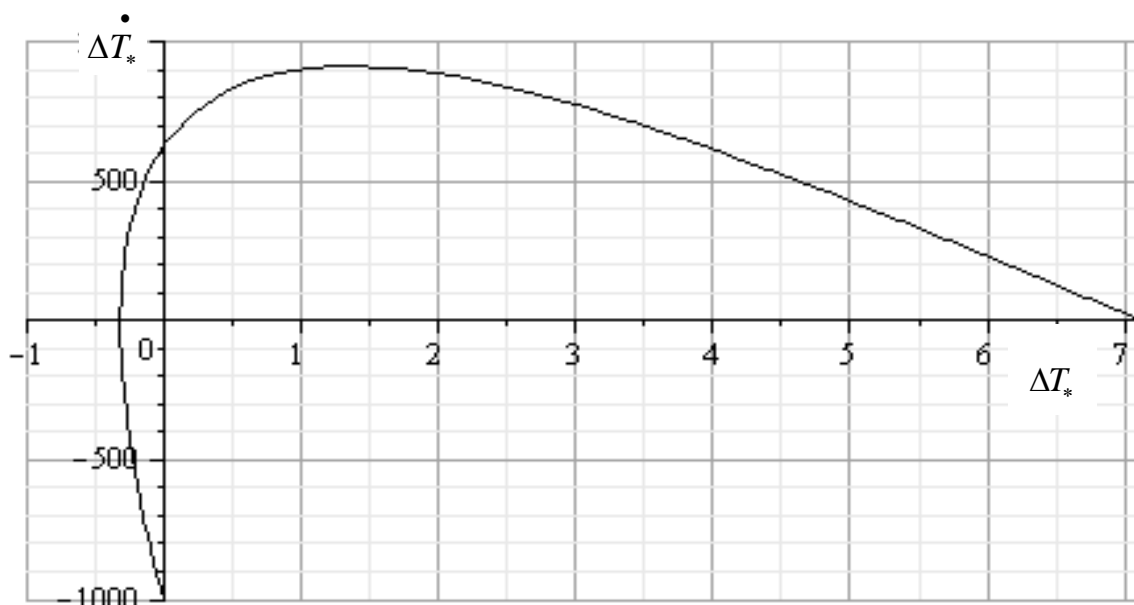


Рис. 4. Фазовый портрет газогенератора водорода

Как следует из рис. 4, процесс генерации водорода в СХП является устойчивым и монотонным, т.е. при функционировании газогенератора в составе такой СХП, параметры которого выбраны в соответствии с полученными рекомендациями, отсутствуют предпосылки к изменению температуры в его полости на величину, превышающую $\Delta T(\infty)$. Величина $\Delta T(\infty)$ является априори расчетной и определяется на этапе проектирования.

Выводы. Применительно к газогенератору СХП водорода на основе СВС определены условия, обеспечивающие выбор его параметров, при значениях которых достигается исключение предпосылок к возникновению пожаровзрывоопасных ситуаций. К таким условиям относятся: обеспечение устойчивого процесса генерации водорода и монотонный характер переходного процесса с величиной перерегулирования, не превышающей 5,0 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов Ю.А. 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.
2. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения и подачи водорода на автотранспортных средствах / В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка. – Харьков: НУГЗУ, 2013. – 236 с.
3. Кривцова В.И. Пожаровзрывобезопасность систем хранения и подачи водорода в форме обратимых гидридов интерметаллидов/ В.И. Кривцова, Ю.П. Ключка, В.Г. Борисенко. – Харьков: НУГЗУ, 2014. – 108с.
4. Абрамов Ю.А. Основы пожарной автоматики / Ю.А. Абрамов. – Харьков: ХВПТУ, 1993. – 288 с.
5. Дорф Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп. – М: Лаборатория базовых знаний, 2004. – 832с.

Ю.О. Абрамов, В.Г. Борисенко, В.И. Кривцова

Про вибір параметрів газогенератора СХП водню на основі високо-температурного синтезу, який самостійно поширюється

Визначено умови, при яких здійснюється вибір параметрів газогенератора СХП водню.

Ключові слова: газогенератор, вогнестійкість, умови вибору параметрів.

On the choice of parameters of the gas generator AC hydrogen-based high-temperature synthesis, which alone applies

The conditions under which the choice of parameters of gasoliner torah SHP hydrogen.

Keywords: gas generator, fire resistance, selection criteria parameters-ditch.