

*М.М. Семерак, д-р техн. наук, професор, А.В. Субота, В.І. Желяк, канд. техн. наук, доцент  
(Львівський державний університет безпеки життєдіяльності)*

## МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ СТРУМЕНЯ ВОДНЮ У РАЗІ РОЗГЕРМЕТИЗАЦІЇ КОРПУСА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ

Проведено теоретичні дослідження параметрів вільного струменя водню, який витікає з пошкодженого корпусу турбогенератора в приміщення машинного залу. Отримані співвідношення дають змогу визначати термодинамічні параметри струменя водню (швидкість витікання, температуру струменя водню на виході з аварійного отвору в корпусі турбогенератора, тривалість витікання при зміні площі аварійного отвору і перепаду тиску) у разі виникнення аварійної ситуації (пошкодження системи газооливного ущільнення).

**Ключові слова:** витікання водню, вільний струмінь водню, турбогенератор, машинний зал, електростанція.

**Постановка проблеми.** До складу Об'єднаної енергосистеми України входить чотири атомні електростанції з 15 енергоблоками та одинадцять теплоелектростанцій з 78-а енергоблоками. Інтенсивне використання енергосистем потребує постійного вдосконалення генеруючого обладнання, підвищення ступеня надійності його роботи і терміну експлуатації. Для ефективної роботи електростанцій використовуються потужні турбогенератори з системами водневого або водо-водневого охолодження.

Незважаючи на всі заходи безпеки, що застосовуються у машинних залах електростанцій з потужними турбогенераторами, виникають аварійні ситуації, пов'язані з пошкодженням систем охолодження турбогенератора та газооливного ущільнення, для роботи яких застосовується вибухопожежонебезпечний газ – водень. Водень з повітрям утворює вибухопожежонебезпечну суміш, яка може утворитися в різних місцях газо-оливної системи турбогенератора, а також в прилеглих вузлах і відсіках при аварійних витіках водню [1].

**Постановка задачі.** При пошкодженні системи газооливного ущільнення, відбувається вільний витік водню з торцевої частини корпусу турбогенератора в приміщення машинного залу електростанції, що призводить до пожежі.

Для оцінки загазованої зони та дії полум'я на несучі металеві конструкції машинного залу при горінні водню необхідно знати такі параметри, як час витікання водню з корпусу турбогенератора, швидкість витікання та її вплив на геометричні характеристики струменя водню.

Масу водню, яка знаходиться в корпусі турбогенератора, можна знайти з рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$m = \mu_i \cdot \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{P \cdot V}{R_i \cdot T}, \quad (1)$$

де  $\mu_i$  – молярна маса речовини,  $\text{кг/моль}$ ;  $P$  – тиск газу,  $\text{Па}$ ;  $V$  – об'єм корпусу турбогенератора,  $\text{м}^3$ ;  $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$  – універсальна газова стала;  $R_i$  – газова стала,  $\frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$ ;  $T$  – температура водню в корпусі турбогенератора,  $\text{К}$ .

Масова витрата водню  $M = \frac{m}{\tau}$ , пов'язана із швидкістю його витікання таким співвідношенням:

$$M = \rho \cdot \omega \cdot v, \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина газу,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\tau$  – тривалість витікання газу,  $\text{с}$ ;  $\omega$  – площа отвору, з якого витікає водень,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – швидкість витікання газу,  $\text{м/с}$ .

Швидкість витікання водню можна визначити за формулою Сен-Венана [2]

$$v = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_{H_2}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (3)$$

де  $P_1$  – тиск водню в корпусі турбогенератора, Па;  $P_2$  – атмосферний тиск, Па;  $k = 1,405$  – показник адіабати;  $\rho_{H_2}$  – густина водню, кг/м<sup>3</sup>.

Таким чином масова витрата водню при його витіканні через отвір, утворений в корпусі турбогенератора при виникненні аварійної ситуації, може бути визначена із залежності

$$M = \omega \cdot \frac{P_1}{R_{H_2} \cdot T_1} \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R_{H_2} \cdot T_1 \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (4)$$

де  $R_{H_2} = \frac{R}{\mu_{H_2}} = 4157 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$  – газова стала для водню;  $T_1$  – температура газу в корпусі турбогенератора, К.

Оскільки тиск водню в корпусі турбогенератора зменшується в процесі його витікання, то буде зменшуватись й швидкість витікання та масова витрата водню. Запишемо (1) в диференціальній формі

$$dm = \frac{V}{R \cdot T} dP. \quad (5)$$

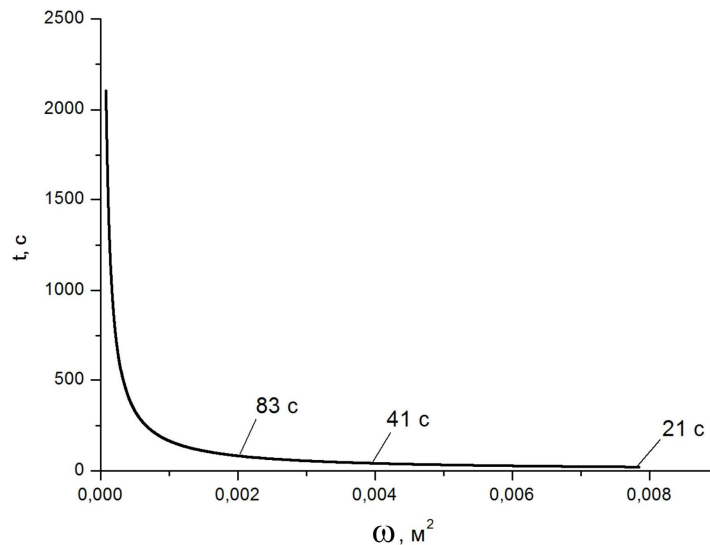
Враховуючи, що  $M = \frac{dm}{d\tau}$  і (5), отримаємо таке співвідношення  $M = \frac{V}{R \cdot T} \frac{dP}{dt}$ .

Таким чином час витікання водню з корпусу турбогенератора

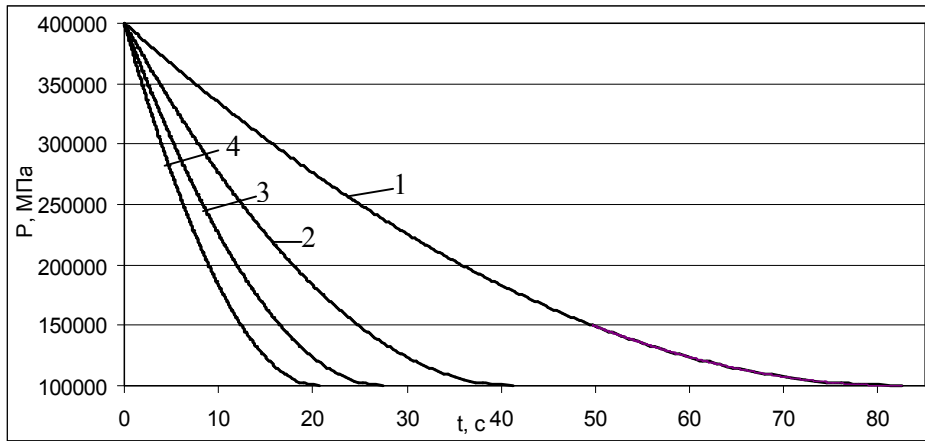
$$\tau(\omega) = \frac{V_1}{\omega \cdot R_{H_2} \cdot T_1} \cdot \int_{P_2}^{P_1} \frac{dP}{\sqrt{2 \cdot \left[ \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P^2}{R_{H_2} \cdot T_1} \cdot \left( \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right) \right]}}, \quad (6)$$

де  $V_1$  – об'єм корпусу турбогенератора, м<sup>3</sup>;  $P$  – змінний тиск у корпусі турбогенератора, Па.

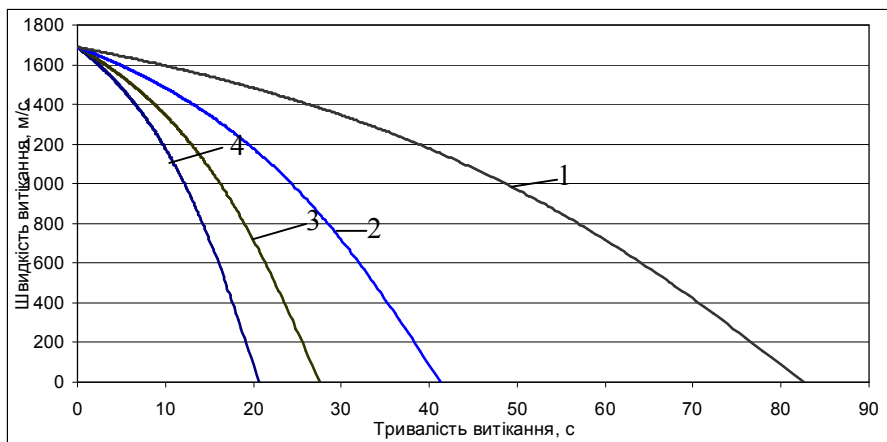
За формулою (6) проведені дослідження параметрів аварійного витікання водню з корпусу турбогенератора. Результати досліджень зображені графічно на рис. 1-3.



**Рис. 1.** Тривалість аварійного витікання водню з корпусу турбогенератора залежно від площі отвору



**Рис. 2.** Зміна тиску в турбогенераторі при розгерметизації (1 – для площі отвору  $0,002 \text{ м}^2$ ; 2 – для площі отвору  $0,004 \text{ м}^2$ ; 3 – для площі отвору  $0,006 \text{ м}^2$ ; 4 – для площі отвору  $0,008 \text{ м}^2$ )



**Рис. 3.** Зміна швидкості аварійного витікання водню з корпусу турбогенератора турбогенератора (1 – для площі отвору  $0,002 \text{ м}^2$ ; 2 – для площі отвору  $0,004 \text{ м}^2$ ; 3 – для площі отвору  $0,006 \text{ м}^2$ ; 4 – для площі отвору  $0,008 \text{ м}^2$ )

Аналіз графічної залежності часу витікання водню з корпусу турбогенератора показує, що при приведений площі отвору  $0,001 \text{ м}^2$  і більше тривалість витікання різко зменшується. Так при отворі площею  $0,002 \text{ м}^2$  тривалість витікання становить 83 с, а при площі  $0,008 \text{ м}^2$  – 21 с. На рис. 2-3 показана зміна тиску і швидкості витікання залежно від часу.

При витіканні водню з корпусу турбогенератора його температура  $T_2$  змінюється за законом [3]:

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{2}{k+1} \quad (7)$$

За формулою (7) проведені розрахунки температури струменя водню на виході з аварійного отвору у разі розгерметизації корпусу турбогенератора. При цьому прийнято, що температура водню в корпусі турбогенератора може змінюватись в інтервалі від 290 – до 320 К. Результати зображені графічно на рис. 4.



**Рис. 4.** Зміна температури струменя водню на виході з аварійного отвору.

Аналіз графічної залежності на рис. 4 показує, що значення величини температури струменя водню при витіканні з корпусу турбогенератора зменшується і змінюється в інтервалі від 240 – до 270 К.

**Висновок.** Записані аналітичні залежності для дослідження швидкості витікання та температури струменя водню на виході з аварійного отвору в корпусі турбогенератора у разі аварійної ситуації.

Досліджено залежність тривалості витікання водню з корпусу турбогенератора при зміні площі аварійного отвору і перепаду тиску.

#### Література:

1. РД 153-34.0-45.512-97. Типовая инструкция по эксплуатации газомасляных систем водородного охлаждения генераторов.
2. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика (Основы механики жидкости). Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1975. – 323 с.
3. Величко Л.Д., Лозинський Р.Я., Семерак М.М. Термодинаміка та теплопередача в пожежній справі. ЛДУ БЖД. – Львів: Вид-во «СПОЛОМ», 2011. – 504 с.

*М.М. Семерак, А.В. Субота, В.И. Желяк*

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУИ ВОДОРОДА ПРИ РОЗГЕРМЕТИЗИРОВАНИИ КОРПУСА ТУРБОГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В работе проведены теоретические исследования параметров свободной струи водорода, которая вытекает из поврежденного корпуса турбогенератора в помещение машинного зала. Полученные соотношения позволяют определять термодинамические параметры струи водорода (скорость истекания, температуру струи водорода на выходе из аварийного отверстия в корпусе турбогенератора, длительность истекания при изменении площади аварийного отверстия и перепада давления) в случае возникновения аварийной ситуации (повреждение системы газо-маслянного уплотнения).

**Ключевые слова:** истекание водорода, свободная струя водорода, турбогенератор, машинный зал, электростанция.

*M.M. Semerak, A.V. Subota, V.I. Zhelyak*

**DESIGN OF THERMO-GASODYNAMICS PARAMETERS OF HYDROGEN STREAM  
IN CASE OF DEPRESSURIZATION OF THE POWER STATION  
TURBOGENERATOR'S BODY**

Theoretical research of parameters of free stream of hydrogen, which flows out of the damaged body of turbogenerator in the apartment of machine hall is conducted. The received correlations allow to determine the thermodynamics parameters of hydrogen stream (speed of profluum, temperature of hydrogen stream on exit from the emergency opening in the body of turbogenerator, duration of profluvium during change of area of the emergency opening and pressure overfall) in the case of emergency situation (damage of gas and oil compression system).

**Keywords:** profluvium of hydrogen, free stream of hydrogen, turbogenerator, machine hall, power-station.

