

ОПРОСТЕН МАТЕМАТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ПАРОГЕНЕРАТОР ПГВ – 1000

Гергана Герова

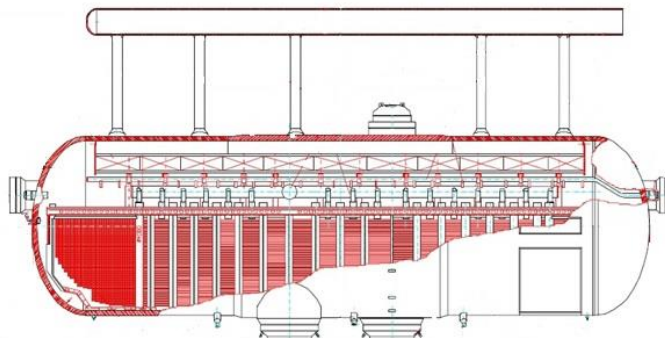
This paper presents a simplified mathematical model of PGV-1000 steam generator. The model describes steam generating process that takes place in the heat exchanger under consideration. For model development are used a series of equations that is part of a steam generator's thermal calculations. Through mathematical equations implemented in MATLAB environment the steam flow rate, primary coolant outlet temperature and thermal power of the steam generator are calculated.

Въведение

Настоящият доклад представя опростен математически модел на хоризонтален парогенератор ПГВ – 1000 (фиг.1), реализиран в среда на MATLAB.

В ядрените електроцентрали, които работят с реактори в вода под налягане, парогенераторът е едно от най-важните съоръжения, тъй като се явява свързващото звено между I и II контур [1]. По тази причина надеждността, характеристиките и параметрите на работа на това оборудване са от първостепенно значение при експлоатацията на този тип реактори [2].

Трябва да се отбележи, че когато ядрената инсталация работи, някои от работните параметри на парогенератора, като температури и масови разходи, както по I, така и по II контур, не са с постоянни стойности.



фиг. 1 Хоризонтален парогенератор ПГВ – 1000

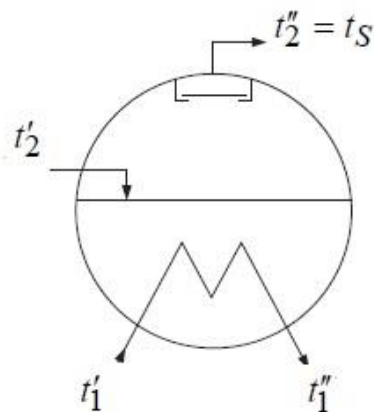
Освен това, по време на генерирането на пара се реализира процес на кипене, който сам по себе си представлява труден за точно моделиране процес [3]. Именно сложността на процесите, които се реализират в тези топлообменници, затрудняват създаването на компютърен симулатор, който да работи в реално време и да отразява тяхното поведение и работа в среда с непостоянни стойности на параметрите [1].

Изчислителна част

Разработеният модел на парогенератора ПГВ–1000 е реализиран чрез представяне на процесите и явленията, които възникват в съоръжението, изразени с математически средства в среда на MATLAB. Чрез използване на серия от уравнения са определени температурата на

топлоносителя на изхода от парогенератора – t_1'' , топлинната му мощност – Q , както и паропроизводителността – D . В разглежданата топлинна схема на парогенератора, която е показана на фиг.2, не са взети под внимание паропрегревателният и економайзерният участък.

С t_1' и t_1'' са означени температурите на топлоносителя на входа и изхода от парогенератора. Те са свързани с енталиите чрез зависимостите $h_1' = c_p(t_1')t_1'$, $h_1'' = c_p(t_1'')t_1''$, където c_p е специфичният топлинен капацитет на средата при постоянно налягане. В тези



фиг. 2 Топлинна схема на парогенератор ПГВ – 1000

Следващата стъпка при провеждане на пресмятането е определяне на количеството топлина – Q , предадено от топлоносителя през топлообменната повърхност на тръбичките на парогенератора и от там на подхранващата вода, която ги обтича. Когато подхранващата вода достигне до температура на насищане – t_s се реализира фазов преход, вследствие на който се получава пара. За да се намери количеството топлина Q , необходимо за преобразуването на подхранващата вода в пара, се използва уравнението на топлопредаването, дадено в [5]:

$$Q = k F \Delta t_{cp} \quad (2)$$

където k е коефициент на топлопредаване, W/m^2K , F – нагревна повърхност на тръбичките на парогенератора, m^2 , Δt_{cp} – средно-логаритмичен температурен напор между топлоносителя и работното тяло, $^{\circ}C$.

Средно-логаритмичният температурен напор Δt_{cp} се намира чрез зависимостта

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_m}{\log \frac{\Delta t_2}{\Delta t_m}}, \text{ където } \Delta t_2 = t_1' - t_s, \Delta t_m = t_1'' - t_s, \text{ а } t_s \text{ е означена температурата на насищане на}$$

работното тяло при съответно налягане, $^{\circ}C$.

За изчисляване на коефициента на топлопредаване k са използвани критериите на

$$\text{Рейнолдс} - Re = \frac{w d \rho}{\mu} \text{ и Прандтл} - Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda}, \text{ където } w \text{ е скоростта на топлоносителя, m/s,}$$

d – диаметър на тръбичките на парогенератора, m , ρ – плътност на топлоносителя, kg/m^3 ; μ – динамичен вискозитет, $Pa \cdot s$; λ – коефициент на топлопроводност, W/mK .

$$\text{Чрез коефициентите на топлопредаване } \alpha_1 = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \frac{\lambda}{d_{ух}} \text{ и } \alpha_2 = 8,24 q^{0,7} \cdot 10^{-3},$$

заедно със S_{cm} – сечението на стената на тръбичките на парогенератора и λ_{cm} – коефициента

на топлопроводност на стената на тръбичките, коефициентът на топлопредаване k може да се представи чрез следната зависимост:

$$k = \left[\frac{1}{\alpha_1} + \frac{S_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\alpha_2} \right]^{-1} \quad (3)$$

След като коефициентът на топлопредаване k е определен специфичният топлинен поток q , може да се намери чрез последователни приближения по (4)

$$q = k \Delta t \quad (4)$$

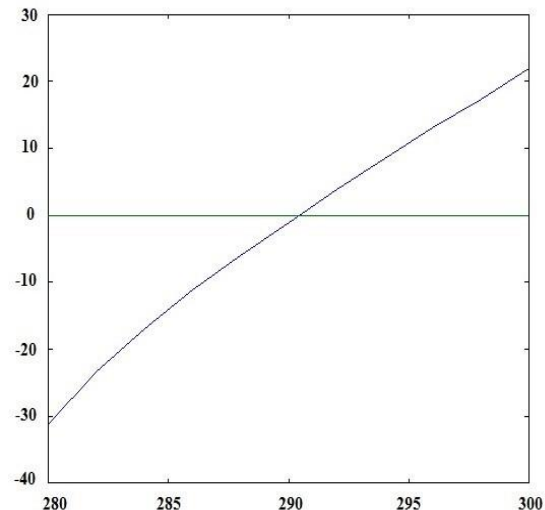
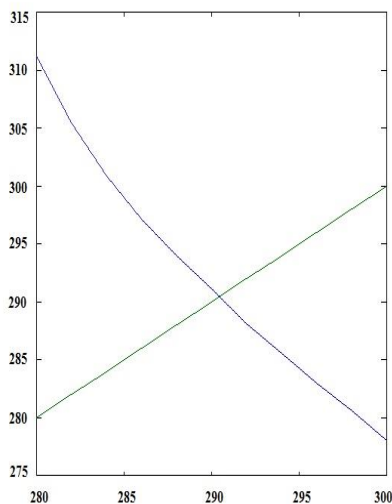
където Δt е Δt_2 или Δt_m според това дали се изчислява топлинният поток на входа или на изхода от парогенератора.

Изброените зависимости показват, че уравнение (1) е едно нелинейно уравнение по отношение на температурата t_1'' на топлоносителя на изхода от парогенератора. Това се дължи на факта, че величината Q в дясната страна на уравнение (1) е доста сложна функция на t_1'' : $Q(t_1'')$.

Използвайки горното означение за Q , уравнение (1) може да се запише по следния начин:

$$t_1'' = \frac{1}{c_p(t_1'')} \left[c_p(t_1') t_1' - \frac{Q(t_1'')}{G\eta} \right] = \varphi(t_1'') \quad (5)$$

Най-естественият метод за решаване на такъв вид уравнение е този на последователните приближения по схемата $t_1''^{(n+1)} = \varphi(t_1''^{(n)})$, започвайки от някакво разумно начално приближение $t_1''^{(0)}$. За съжаление, графиката на функцията $\varphi(t)$, апроксимирана по няколко стойности на t в интервала $t = [280, 315]$ показва, че този метод е разходящ. Причината за това е, че наклонът на тангентата към кривата е по-голям по абсолютна стойност от единица, както е показано на фиг.3.



фиг. 3 Графики на функциите *Error! Objects cannot be created from editing field codes.*
 фиг. 4 Графика на функцията *Error! Objects cannot be created from editing field codes.*
 и *Error! Objects cannot be created from editing field codes.* от уравнение (5)
 от уравнение (6)

Затова уравнение (1) може да се представи във вида:

$$db(t_1'') = c_p(t_1'') \cdot t_1'' - c_p(t_1') \cdot t_1' - \frac{Q(t_1'')}{G\eta} = 0 \quad (6)$$

като функцията $db(t_1'')$ представя дебаланса между отдадената от топлоносителя и приетата от работното тяло топлина. Графиката на тази функция в разглеждания интервал от температури е показан на фиг.4.

От тази графика личи, че в избрания температурен интервал уравнение (6) има точно един корен. Тук следва да се отбележи, че разглежданият интервал е отвореният интервал (t_s, t_1') . Крайните точки на интервала не могат да участват в изчисленията, тъй като за тях Δt_{cp} не може да се определи. Записаното чрез (6) балансово уравнение се решава чрез метода на бисекцията до някаква предварително зададена точност (1%).

При зададена температура $t_1' = 320^\circ C$ на топлоносителя на входа на парогенератора и температура на насищане $t_s = 278,8^\circ C$, за температурата на изхода от парогенератора се получава $t_1'' = 285,15^\circ C$.

След получаване на тази температура и свързаната с нея топлинна мощност Q , от уравнението $Q = (D + D_{cu} + D_{np})(h_s - h_{ng}) + (D + D_{cu})r$ може да се определи паропроизводството D на парогенератора. Тук $D_{cu} = (0,015 \div 0,3)D$ е разхода на пара за собствени нужди, $D_{np} = (0,005 \div 0,01)D$ – разход на пара за продувки, а h_s и h_{ng} са съответно енталпите на парата при температура на насищане и тази на подхранващата вода. r е означена скритата топлина на фазовия преход при изпарение, определена от [1] при съответното налягане.

При приетите параметри на парогенератора за топлинната му мощност се получава $Q = 757,88 MW$, а за паропроизводството – $D = 220,80 kg / s$

Заклучение

Получените в резултат на извършеното топлинно пресмятане стойности на параметрите на парогенератора ПГВ – 1000 до голяма степен съответстват на проектните параметри на съоръжението. Обект на последващ анализ е детайлното сравнение на резултатите, получени от представения математически модел, с резултатите, получени чрез термохидравличния код ATHLET, при различни работни режими.

Разработеният алгоритъм може да участва като част от реализирането на опростен симулационен модел на основното оборудване в I контур на ядрена електроцентраля с реактор с вода под налягане от типа ВВЕР-1000.

Литература:

- [1] A simplified mathematical model of a U-tube steam generator under variable load conditions, Rafal Laskowski, Janusz Lewandowski, archives of thermodynamics Vol. 34(2013), No. 3, 75–88 DOI: 10.2478/aoter-2013-0016
- [2] A simulation of a steam generator tube rupture in a VVER-1000 plant, M.R. Nematollahi, A. Zare, School of Engineering, Shiraz University, Zand Avenue, Shiraz, 71348-51154, Iran
- [3] Thermal-fluid simulation of nuclear steam generator performance using Flownex and RELAP5/mod3.4, Charl Cilliers
- [4] Термодинамични и топлофизични свойства на веществата, Георги Каменов, Издателство „Техника“, София, 1995г.
- [5] МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПАРОГЕНЕРАТОРА ТИПА ПГВ-1000 ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР, А. В. ЕФИМОВ, В. Л. КАВЕРЦЕВ, Т. В. ПОТАНИНА, Т. А. ГАРКУША, Т. А. ЕСИПЕНКО, ЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ТЕПЛОТЕХНІЧНІ ПРОЦЕСИ Й УСТАТКУВАННЯ, ISSN 2078-774X. Вісник НТУ «ХП». 2014. № 13(1056)