

О. М. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, Н. В. КОЦЮБА, А. І. БУБНОВ

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЕС ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ

Розроблені математичні моделі теплових процесів у формі Коші в просторі стану з відносними змінними парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку атомної електричної станції з ядерним реактором ВВЕР-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління парогенератором. Розглянуто робочі теплові процеси в парогенераторі ПГВ-1000, які пов'язані з підведенням до нього живильної води від системи водяної підготовки і теплоносія від ядерного реактора та відведенням пари у головний паровий колектор. Представлена розрахункова схема парогенератора, яка відображає робочі процеси в ньому під дзеркалом випаровування і над ним. На основі диференціальних рівнянь теплового балансу теплоносія в парогенераторі та в металевих теплообмінних трубках виконане моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі. Розроблена модель теплопередачі у вигляді лінійної системи диференціальних рівнянь у відносних змінних стану. Розглянуті процеси пароутворення при нагріванні живильної води поверхню теплопередачі. Складені диференціальні рівняння матеріального і теплового балансів динамічних процесів пароутворення в парогенераторі, які не є рівняннями у формі Коші. Виконані перетворення диференціальних рівнянь матеріального і теплового балансів в парогенераторі до форми Коші. Отримана нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у відносних змінних стану. Обчислені значення постійних параметрів моделей для парогенератора ПГВ-1000. Математична модель теплових процесів в парогенераторі ПГВ-1000, яка представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь і включає процеси теплопередачі та пароутворення, за допомогою інформаційної технології оптимізації дозволить виконати ідентифікацію та оптимізацію системи управління парогенератором.

Ключові слова: атомна електрична станція, парогенератор, теплові процеси, математична модель, диференціальні рівняння, оптимізація, управління, інформаційна технологія.

Е. Н. НИКУЛИНА, В. П. СЕВЕРИН, Н. В. КОЦЮБА, А. И. БУБНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПАРОГЕНЕРАТОРА АЭС ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ

Разработаны математические модели тепловых процессов в форме Коши в пространстве состояния с относительными переменными парогенератора ПГВ-1000 энергоблока атомной электростанции с ядерным реактором ВВЭР-1000 для использования моделей в информационной технологии оптимизации управления парогенератором. Рассмотрены рабочие тепловые процессы в парогенераторе ПГВ-1000, связанные с подведением к нему питательной воды от системы водяной подготовки и теплоносителя от ядерного реактора и отводом пара в главный паровой коллектор. Представлена расчетная схема парогенератора, которая отражает рабочие процессы в нем под зеркалом испарения и над ним. На основе дифференциальных уравнений теплового баланса теплоносителя в парогенераторе и в металлических теплообменных трубках выполнено моделирование теплопередачи от теплоносителя к питательной воде в парогенераторе. Разработана модель теплопередачи в виде линейной системы дифференциальных уравнений в относительных переменных состоянии. Рассмотрены процессы парообразования при нагревании питательной воды поверхностью теплопередачи. Составлены дифференциальные уравнения материального и теплового баланс динамических процессов парообразования в парогенераторе, которые не являются уравнениями в форме Коши. Выполнены преобразования дифференциальных уравнений материального и теплового баланс в парогенераторе к форме Коши. Получена нелинейная система дифференциальных уравнений баланса парообразования в относительных переменных состоянии. Вычислены значения постоянных параметров моделей для парогенератора ПГВ-1000. Математическая модель тепловых процессов в парогенераторе ПГВ-1000, которая представлена в виде системы дифференциальных уравнений и включает процессы теплопередачи и парообразования, с помощью информационной технологии оптимизации позволит выполнить идентификацию и оптимизацию системы управления парогенератором.

Ключевые слова: атомная электростанция, парогенератор, тепловые процессы, математическая модель, дифференциальные уравнения, оптимизация, управление, информационная технология.

O. M. NIKULINA, V. P. SEVERYN, N. V. KOTSUBA, A. I. BUBNOV

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES OF A NPP STEAM GENERATOR FOR INFORMATION TECHNOLOGY OPTIMIZED CONTROL

Mathematical models of thermal processes in the form of Cauchy in the state space with relative variables of the steam generator PGV-1000 of the power unit of a nuclear power plant with a nuclear reactor VVER-1000 have been developed for the using of models in information technology for optimizing the control of a steam generator. The working thermal processes in the PGV-1000 steam generator associated with the supply of feed water to it from the water treatment system and the coolant from the nuclear reactor and the removal of vapors to the main steam header are considered. The design diagram of the steam generator is presented, which reflects the working processes in it under the evaporation mirror and above it. On the basis of differential equations of the heat balance of the heat carrier in the steam generator and in the metal heat exchange tubes, the simulation of heat transfer from the heat carrier to the feed water in the steam generator is carried out. The heat transfer model in the form of a linear system of differential equations in relative state variables is developed. The processes of vaporization during heating of feed water by the heat transfer surface are considered. Differential equations of material and heat balances of dynamic processes of vaporization in a steam generator are compiled, which are not equations in the Cauchy form. Transformations of the differential equations of material and heat balances in the steam generator to the Cauchy form are carried out. A nonlinear system of differential equations for the balance of vaporization in relative state variables is obtained. The values of the constant parameters of the models for the steam generator PGV-1000 are calculated. The mathematical model of thermal processes in the PGV-1000 steam generator, which is presented in the form of a system of differential equations and includes the processes of heat transfer and steam generation, will make it possible to identify and optimize the steam generator control system with the help of information optimization technology.

Keywords: nuclear power plant, steam generator, thermal processes, mathematical model, differential equations, optimization, control, information technology.

Вступ. Енергоблоки атомних електричних станцій з ядерними реакторами ВВЕР-1000 експлуатуються на протязі десятиріч і потребують модернізації [1–5]. Парогенератор (ПГ) ПГВ-1000 є одним з найважливіших елементів енергоблоку АЕС з реактором ВВЕР-1000, у якому протікають складні теплові процеси, що можуть спричинити аварійні ситуації [6–9]. Тому моделювання теплових процесів парогенератора ПГВ-1000 енергоблоку АЕС як об'єкта управління є актуальною задачею. Для можливості використання математичних моделей в інформаційній технології оптимізації управління моделі повинні бути в просторі стану відносних змінних у формі Коші, що дозволить розв'язати задачі ідентифікації та оптимізації параметрів моделей [10–12].

Мета даної статті полягає в розробці математичних моделей у формі Коші в просторі стану відносних змінних теплових процесів парогенератора ПГВ-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління.

Для досягнення поставленої мети розглянуто робочі процеси в парогенераторі ПГВ-1000 та представлена їх розрахункова схема, розглядаються теплові процеси в парогенераторі та виконується моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі у вигляді системи диференціальних рівнянь (СДР), виконується перетворення рівнянь матеріального і теплового балансів пароутворення та будується нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у формі Коші в просторі стану відносних змінних.

Розрахункова схема для моделювання парогенератора. Робочий процес парогенератора ПГВ-1000 пов'язаний з підведенням до нього живильної води і теплоносія та відведенням пари [6]. Парогенератор як об'єкт управління поділяється на водяний і паровий акумулятори. Робоче середовище – живильна вода надходить у водяний акумулятор, де змінює свій агрегатний стан за рахунок тепла, яке передається поверхню трубок теплоносія. Оскільки процес пароутворення відбувається по всьому об'єму трубних пучків, то під дзеркалом випаровування (ДВ) міститься пароводяна суміш, тобто паровий акумулятор частково знаходиться всередині водяного акумулятора. Іншу частину парового акумулятора утворює паровий простір над ДВ. Наявність пари у водяному акумуляторі ПГ обумовлює рух робочого середовища в циркуляційному контурі, який в свою чергу викликає перехід пари з парового акумулятора під ДВ в паровий акумулятор над ДВ [3, 6].

Розрахункова схема для моделювання парогенератора, що описує робочий процес, який в ньому відбувається, представлена на рис. 1 і включає рухомий в теплообмінних пучках теплоносії (ТН), метал теплообмінної поверхні, колектор подачі живильної води (ЖВ), водяний акумулятор ПГ, ДВ, паровий акумулятор під ДВ, паровий акумулятор над ДВ, вихід пари до головного парового колектора. Теплоносії – вода маси M_t , об'єму V_t , щільності ρ_t і середньою температурою t_t передає теплову потужність Q металу трубних пучків. Цей метал із загальною масою M_m ,

об'ємом V_m , густиною ρ_m та середньою температурою t_m передає теплову потужність Q_m через поверхню теплообміну площі F_m живильній воді, яка надходить в ПГ через колектор ЖВ і має масову витрату G_w та ентальпію j_w . При нагріванні маси води M_w об'єму V_w з щільністю ρ_w і середньою температурою t_w і ентальпією i_w частина води випаровується й у вигляді пари надходить з масовою витратою G_b в паровий акумулятор під ДВ, що має масу M_b , об'єм V_b , щільність ρ_s і ентальпію i_s . В результаті циркуляції пароводяної суміші під ДВ відбувається через ДВ площі F_c перехід пари з парового акумулятора під ДВ з масовою витратою G_a в паровий акумулятор над ДВ, що має масу M_a , об'єм V_a , щільність ρ_s і ентальпію i_s . Рівень ДВ характеризується абсолютною координатою рівня ДВ H_c і визначається об'ємом V_c пароводяної суміші під ДВ. Після виходу з ПГ насичена пара з масовою витратою G_s надходить в головний паровий колектор, а потім подається в парову турбіну.

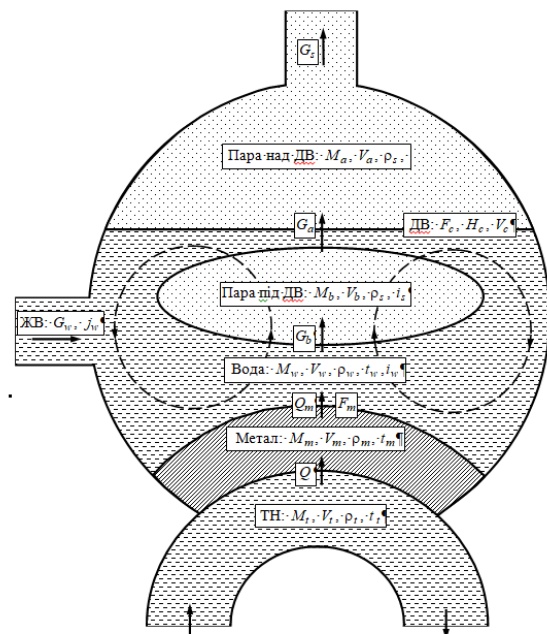


Рис. 1. Розрахункова схема парогенератора

Моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води. За розрахунковою схемою ПГ, представленої на рис. 1, розглянемо процес теплопередачі від теплоносія, що поступає від ядерного реактора, до живильної води в ПГ та складемо диференціальні рівняння теплового балансу, на підставі яких розробимо математичну модель процесу теплопередачі.

Всі трубки теплообмінного пучка ПГ представимо однією еквівалентною трубкою, яка представляється об'єктом з зосередженими параметрами – одним суцільним об'ємом теплоносія, оточеним металеву оболонкою. Маса теплоносія в еквівалентній трубці M_t дорівнює сумарній масі теплоносія у всіх трубках, її об'єм – V_t , щільність – ρ_t , середня температура – t_t . Маса металеві оболонки теплоносія M_m дорівнює

сумарній масі всіх металевих трубок, її об'єм – V_w , щільність – ρ_m , середня температура – t_m (рис. 1).

Приймемо допущення, що процеси передачі теплоти від теплоносія до металу еквівалентної трубки і від металу до живильної води в ПГ відбуваються без втрат, тому в статистиці $Q_m = Q$ (рис. 1). Рух теплоносія в теплообмінних трубках турбулентний. Площі металеві поверхні з боку теплоносія і з боку живильної води в ПГ однакові й рівні F_m . При розгляді теплових процесів питомі теплоємності теплоносія c_t і металу c_m постійні. Також постійні коефіцієнти теплопровідності та коефіцієнти тепловіддачі [11]. Градієнтами температури за об'ємом теплоносія і товщиною металевих теплообмінних трубок нехтуємо. Теплові характеристики і щільності теплоносія та металу однорідні й не залежать від просторових координат.

Запишемо диференціальні рівняння (ДР) теплопередачі від теплоносія до живильної води. Замінюючи всі трубки протікання теплоносія в ПГ однією еквівалентною трубкою і вважаючи її об'єктом з зосередженими параметрами, запишемо рівняння теплового балансу теплоносія (рис. 1):

$$c_t M_t dt_t / d\tau = Q - \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m), \quad (1)$$

де α_{tm} – коефіцієнт тепловіддачі від теплоносія до трубки. Нехтуючи градієнтом температури за товщиною трубки, запишемо рівняння теплового балансу еквівалентної трубки (рис. 1):

$$c_m M_m dt_m / d\tau = \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m) - \alpha_w F_m (t_m - t_w), \quad (2)$$

де α_w – коефіцієнт тепловіддачі від трубки до живильної води в ПГ.

Модель теплопередачі у відносних змінних. Перейдемо до відносних змінних:

$$\tau = t/t_b, \quad q = Q/Q_b, \quad \theta_t = t_t/T_b, \quad \theta_m = t_m/T_b, \quad \theta_w = t_w/T_b, \quad (3)$$

де t_b , Q_b і T_b – базові значення часу, теплової потужності та температури. Прирівнюючи в ДР (1) і (2) похідні до нуля, отримуємо статичні залежності:

$$Q = \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m), \quad \alpha_{tm} F_m (t_t - t_m) = \alpha_w F_m (t_m - t_w).$$

З цих залежностей маємо:

$$t_m = t_w + Q/(\alpha_w F_m), \quad t_t = t_m + Q/(\alpha_{tm} F_m). \quad (4)$$

У номінальному режимі середні температури металу трубки і теплоносія за формулами (4) приймають значення:

$$t_{0m} = t_{0w} + Q_0/(\alpha_w F_m), \quad t_{0t} = t_{0m} + Q_0/(\alpha_{tm} F_m).$$

При цьому

$$Q_0 = \alpha_{tm} F_m (t_{0t} - t_{0m}), \quad \alpha_{tm} F_m (t_{0t} - t_{0m}) = \alpha_w F_m (t_{0m} - t_{0w}).$$

З виразів (3) представимо температури через відносні змінні:

$$t = t_b \tau, \quad Q = Q_b q, \quad t_t = T_b \theta_t, \quad t_m = T_b \theta_m, \\ t_w = T_b \theta_w$$

Підставимо ці вирази в рівняння (1) і (2):

$$c_t M_t \frac{T_b d\theta_t}{t_b d\tau} = Q_b q - \alpha_{tm} F_m T_b (\theta_t - \theta_m),$$

$$c_m M_m \frac{T_b d\theta_m}{t_b d\tau} = \alpha_{tm} F_m T_b (\theta_t - \theta_m) - \alpha_w F_m T_b (\theta_m - \theta_w).$$

Розділимо обидва рівняння на коефіцієнти перед похідними лівих частин і позначимо постійні узагальнені параметри:

$$a_{tm} = \alpha_{tm} F_m t_b / c_t M_t, \quad b_{tq} = Q_b t_b / c_t M_t T_b, \quad (5)$$

$$a_{mt} = \alpha_{tm} F_m t_b / c_m M_m, \quad a_{mw} = \alpha_w F_m t_b / c_m M_m. \quad (6)$$

З цими параметрами отримаємо динамічну модель теплопередачі в відносних змінних у вигляді Коші:

$$d\theta_t / d\tau = b_{tq} q - a_{tm} (\theta_t - \theta_m), \quad (7)$$

$$d\theta_m / d\tau = a_{mt} (\theta_t - \theta_m) - a_{mw} (\theta_m - \theta_w). \quad (8)$$

Ця модель теплопередачі представляє лінійну СДР. Для номінального режиму початкові умови СДР нульові. Вхідною величиною служить зміна теплової потужності теплоносія, вихідною величиною – відносне значення середньої температури води. У табл. 1 представлені значення вихідних параметрів моделі теплопередачі (7) і (8), обчислених за формулами (5) і (6) на основі конструктивних і технологічних параметрів ПГВ-1000 [4–9].

Таблиця 1 – Параметри СДР теплопередачі

Параметр	Значення	Параметр	Значення
b_{tq}	0,12	a_{tm}	0,78
a_{mt}	1,34	a_{mw}	2,70

Рівняння балансу робочого середовища. Розглянемо процеси пароутворення при нагріванні живильної води поверхнею теплопередачі. Для цього складемо ДР матеріального і теплового балансів. На підставі цих рівнянь розробимо математичну модель процесу пароутворення.

Температура двофазної суміші в ПГ дорівнює температурі насичення і змінюється при зміні тиску. В ПГ швидкості робочого тіла, а отже, і перепади тиску, викликані гідравлічними опорами, відносно невеликі, тому вважаємо, що значення тиску p у всіх точках

робочого тіла всередині об'єму ПГ однакове. Крім того, вважаємо, що вся вода і вся пара в ПГ мають температуру, рівну температурі насичення t_w і залежну від тиску [3, 6].

Ентальпія i_w води в ПГ практично дорівнює ентальпії кипіння води при тиску p і температурі t_w на лінії насичення. Оскільки в ПГ живильна вода надходить з ентальпією j_w , відповідній великому недогріву до кипіння, вважаємо, що живильна вода доводиться до кипіння в ПГ за рахунок підігріву її теплом, поширюваним по металу трубок, і за рахунок змішування її з парою і водою під ДВ.

Кількісно пароутворення і рух пароводяної суміші в трубних пучках відбуваються по-різному по рядах трубок і по трубках одного ряду. Ці явища усереднимо, тобто замінимо трубні пучки однією трубою, еквівалентною всім пучкам за швидкостями руху робочого середовища і за об'ємом. Вважаючи, що функції зануреного дірчастого листа (ЗДЛ) по вирівнюванню навантаження ДВ і функції пристроїв сепарації пара частково виконуються усередненням значень параметрів ПГ, впливом ЗДЛ і пристроїв сепарації на динаміку ПГ нехтуємо.

Теплові характеристики та щільності частин води і пари однорідні та не залежать від просторових координат. У парових акумуляторах під і над ДВ щільність пари ρ_s і його ентальпія i_s однакові. Щільності води ρ_w і пари ρ_s , а також їх ентальпії i_w і i_s залежать тільки від тиску p на лінії насичення [3, 6].

Процесами продукції в ПГ та іншими втратами води і пари в ПГ нехтуємо, тому в статичних режимах виконується рівність масових витрат води і пари: $G_w = G_b = G_a = G_s$.

На зміну рівня в динамічних режимах впливають тільки гідравлічні і теплові процеси всередині ПГ, а також зміна теплової потужності теплоносія Q і масових витрат живильної води G_w і свіжої пари G_s . Стан ПГ повністю визначається середніми температурами теплоносія t_t і металу t_m , тиском p пароводяної суміші, об'ємами води V_w і пароводяної суміші V_c , а також витратою пари G_a через ДВ (рис. 1).

Рівень ДВ в ПГ, а також витрати живильної води і свіжої пари вимірюються датчиками без статичних і динамічних похибок. Статичні характеристики регулюючих клапанів лінійні.

Для моделювання динаміки ПГ використаємо рівняння маси, енергії та об'єму. Рівняння збереження маси речовини в ПГ [3, 6]

$$d(M_w + M_s)/dt = G_w - G_s - G_p, \quad (9)$$

де M_s – маса пари в ПГ; G_p – масова витрата на продукту.

Рівняння збереження енергії [3, 6]

$$d(M_w i_w + M_s i_s)/dt = Q_m + G_w j_w - G_s i_s - G_p i_w. \quad (10)$$

Оскільки сумарний об'єм води і пари в ПГ V постійний і $V_m + V_n = V$, то

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{M_w}{\rho_w} + \frac{M_s}{\rho_s} \right) = 0. \quad (11)$$

Величини i_w, i_s, ρ_w, ρ_s є функціями тиску p . Після диференціювання лівих частин ДР (9)–(11) як складних функцій та після перетворень цих рівнянь отримаємо ДР:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{K_{Gw}G_w - K_{Gp}G_p - K_{Gs}G_s + K_{Qm}Q_m}{K_{Vw}V_w + K_{Vs}V_s}, \quad (12)$$

$$dV_w/dt = (G_w - G_g - G_p - \rho_{sp}p_t V_w)/\rho_w, \quad (13)$$

$$dV_s/dt = (G_g - G_s - \rho_{sp}p_t V_s)/\rho_s, \quad (14)$$

$$G_g = \left[Q_m - (i_{wp}\rho_w V_w + i_{sp}\rho_s V_s) p_t - G_w \Delta i_{ww} \right] / r_s, \quad (15)$$

$$dV_c/dt = [\rho_p p_t (V - V_s) - G_a - G_s] / \rho_s, \quad (16)$$

де $K_{Gw}, K_{Gp}, K_{Gs}, K_{Qm}, K_{Vw}, K_{Vs}, \rho_{sp}, i_{wp}, i_{sp}, r_s$ – постійні параметри, які обчислюються за параметрами рівнянь (9)–(11).

Отримано чотири ДР (12)–(14) та (16) для чотирьох невідомих функцій часу – тиску $p(t)$, об'єму води у водяному акумуляторі $V_w(t)$, об'єму пари в ПГ $V_s(t)$ і об'єму пароводяної суміші під ДВ $V_c(t)$.

Рівняння балансу робочого середовища у відносних змінних. Введемо відносні змінні:

$$\pi_p = p/p_0, \quad \xi_w = V_w/V_{0w}, \quad \xi_s = V_s/V_{0s}, \quad \xi_c = \Delta h_c/h_{0c} \quad (17)$$

$$g_w = G_w/G_0, \quad g_s = G_s/G_0, \quad g_g = G_g/G_0, \quad g_a = G_a/G_0, \quad q_m = Q_m/Q_0, \quad (18)$$

де p_0, V_{0w}, V_{0s} і h_{0c} – значення тиску, об'ємів води та пари, а також допустимого рівня води в номінальному режимі.

В результаті перетворень рівнянь матеріального і теплового балансів ПГ (12)–(16) з позначеннями (17) і (18) отримані рівняння у відносних змінних:

$$\begin{cases} \pi_{pt} = \frac{b_{pw}g_w + b_{ps}g_s + q_m}{a_{pw}\xi_w + a_{ps}\xi_s}, & \frac{d\pi_p}{d\tau} = \pi_{pt}, \\ g_g = b_{gq}q_m - (a_{gw}\xi_w + a_{gs}\xi_s)\pi_{pt} - b_{gg}g_w, \\ d\xi_w/d\tau = b_{wg}(g_w - g_g) - a_{wp}\xi_w\pi_{pt}, \\ d\xi_s/d\tau = b_{sg}(g_g - g_s) - a_{sp}\xi_s\pi_{pt}, \\ d\xi_c/d\tau = (c_c - a_{cc}\xi_c)\pi_{pt} + b_{cg}(g_s - g_a). \end{cases} \quad (19)$$

Цій СДР відповідають початкові умови номінального режиму:

$$\pi_p(0) = 1, \quad \xi_w(0) = 1, \quad \xi_s(0) = 1, \quad \xi_c(0) = 0. \quad (20)$$

У табл. 2 представлені значення вихідних параметрів ПГ для рівнянь балансу (19), обчислених за формулами (5) і (6) на основі конструктивних і технологічних параметрів ПГВ-1000 [4–9].

Таблиця 2 – Параметри СДР балансу

Параметр	Значення	Параметр	Значення
b_{pw}	-0,119	a_{wp}	0,048
b_{ps}	-0,881	b_{sg}	0,125
a_{pw}	19,080	a_{sp}	1,120
a_{ps}	7,540	c_c	11,990
b_{gq}	1,187	a_{cc}	1,120
a_{gw}	23,370	b_{cg}	2,550
a_{gs}	-0,380	b_{gg}	0,187
b_{wg}	0,010	–	–

Отримані рівняння балансу (21) містять невідому відносно змінну витрати пари через ДВ g_a . Для її визначення потрібно розглянути процес циркуляції пароводяної суміші під ДВ.

Висновки. Дана стаття присвячена розробці математичних моделей теплових процесів у формі Коші в просторі стану відносних змінних парогенератора ПГВ-1000 для використання моделей в інформаційній технології оптимізації управління парогенератором. Результати проведених досліджень дозволяють зробити наступні висновки.

1. Розглянуто робочі процеси в парогенераторі ПГВ-1000, пов'язані з підведенням до нього живильної води і теплоносія та відведенням пари. Представлена розрахункова схема парогенератора, що відображає робочі процеси, що в ньому відбуваються.

2. На основі рівнянь теплового балансу теплоносія всередині парогенератора та металевих теплообмінних труб виконане моделювання теплопередачі від теплоносія до живильної води в парогенераторі. Розроблено модель теплопередачі парогенератора у вигляді лінійної системи диференціальних рівнянь у відносних змінних стану та обчислені значення параметрів моделі теплопередачі для парогенератора ПГВ-1000.

3. Виконані перетворення диференціальних рівнянь матеріального і теплового балансів динамічних процесів пароутворення в парогенераторі. Отримана нелінійна система диференціальних рівнянь балансу пароутворення у відносних змінних стану та обчислені значення постійних параметрів цієї системи для парогенератора ПГВ-1000.

Список літератури

1. Иванов В. А. *Регулирование энергоблоков*. Ленинград: Машиностроение, 1982. 311 с.
2. Иванов В. А. *Эксплуатация АЭС: учебник для вузов*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1994. 384 с.
3. Демченко В. А. *Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС*. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.

4. Денисов В. П., Драгунов Ю. Г. *Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций*. Москва: ИздАТ, 2002. 480 с.
5. Андрущенко С. А., Васильев Б. Ю., Генералов В. Н. и др. *АЭС с реакторами ВВЭР-1000*. Москва: Логос, 2010. 604 с.
6. Демченко В. А., Тодорцев Ю. К., Ложечников В. Ф. Математическая модель участка питания парогенератора ПГВ-1000. *Вестник Харьковского государственного политехнического университета. Сер.: Системный анализ, управление и информационные технологии*. Харьков: ХГПУ, 1999. Вып. 73. С. 133–138.
7. Ефимов А. В., Гончаренко Л. В., Потанина Т. В. и др. *Совершенствование и оптимизация моделей, процессов, конструкций и режимов работы энергетического оборудования АЭС, ТЭС и отопительных котельных*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2013. 376 с.
8. Ефимов А. В., Пелипенко Н. Н. *Конструкции, материалы, процессы и расчеты реакторов и парогенераторов АЭС*. Харьков: Підручник НТУ «ХПІ», 2010. 307 с.
9. Ефимов А. В., Каверцев В. Л., Потанина Т. В., Гаркуша Т. А., Есипенко Т. А. Математическая модель горизонтального парогенератора типа ПГВ-1000 энергоблока АЭС с ВВЭР. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2014. № 13(1056). С. 92–102.
10. Северин В. П., Никулина Е. Н., Трубочанова Н. В. Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Сер.: Автоматика та приладобудування*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2016. № 15 (1187). С. 38–44.
11. Nikulina E. N., Severyn V. P., Kotsiuba N. V. Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2018. № 21 (1297). С. 8–13.
12. Нікуліна О. М., Северин В. П., Коцюба Н. В. Розробка інформаційної технології оптимізації управління складними динамічними системами. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: сб. наук. пр. Темат. вип.: Системний аналіз, управління та інформаційні технології*. Харьков: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 63–69.

References (transliterated)

1. Ivanov V. A. *Regulirovaniye energoblokov* [Regulation of power units]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1982. 311 p.
2. Ivanov V. A. *Ekspluatatsiya AES: uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: a textbook for universities]. St. Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994. 384 p.
3. Demchenko V. A. *Avtomatizatsiya i modelirovaniye texnologicheskikh processov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of NPP and TPP]. Odessa, Astroprint Publ., 2001. 305 p.
4. Denisov V. P., Dragunov Yu. G. *Reaktornyye ustanovki VVER dlya atomnykh elektrostantsiy* [Reactor installations of WWER for nuclear power plants]. Moscow, IzdAT Publ., 2002. 480 p.
5. Andrushechko S. A., Vasil'yev B. Yu., Generalov V. N. et al. *AES s reaktorami tipa VVER-1000* [NPPs with WWER-1000 reactors]. Moscow, Logos Publ., 2010. 604 p.
6. Demchenko V. A., Todorcev Yu. K., Lozhechnikov V. F. Matematicheskaya model' uchastka pitaniya parogeneratora PGV-1000 [Mathematical model of power supply section of steam generator PGV-1000]. *Vestnik Kharkovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta: sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemyy analiz, upravleniye i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the Kharkov State Polytechnic University. Thematic issue: System analysis, control and information technology]. Kharkov, KhGPU Publ., 1999, issue 73, pp. 133–138.
7. Efimov A. V., Goncharenko L. V., Potanina T. V. et al. *Sovershenstvovaniye i optimizatsiya modeley, processov, konstruksiy i rezhimov raboty energeticheskogo oborudovaniya AES, TES i otopitel'nykh kotel'nykh* [Perfection and optimization of models, processes, designs and operating modes of power equipment of NPP,

- TPP and heating boilers]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2013. 376 p.
8. Efimov A. V., Pelipenko N. N. *Konstruktzii, materialy, protsessy i raschety reaktorov i parogeneratorov AES* [Constructions, materials, processes and calculations of reactors and steam generators of NPP]. Kharkiv, Pidruchnyk NTU "KhPI" Publ., 2010. 307 p.
 9. Efimov A. V., Kavertsev V. L., Potanina T. V., Garkusha T. A., Esipenko T. A. *Matematicheskaya model' gorizontalnogo parogeneratora tipa PGV-1000 energobloka AES s VVER* [Mathematical model of a horizontal steam generator of the PGV-1000 type of the power unit of NPP with WWER]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Energetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustakuvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Power and heat engineering processes and equipment]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 13 (1056), pp. 92–111.
 10. Severin V. P., Nikulina E. N., Trubchanova N. V. *Identifikatsiya parametrov sistemy upravleniya proizvoditel'nost'yu parogeneratora energobloka AES* [Identification of parameters of the control system of productivity of steam generator of the nuclear power]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Avtomatyka ta prykladobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: Automation and instrumentation]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2016, no. 15 (1187), pp. 38–44.
 11. Nikulina E. N., Severin V. P., Kotsiuba N. V. *Optimization of direct quality indexes of automatic control systems of steam generator productivity* *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2018, no. 21 (1297), pp. 8–13.
 12. Nikulina E. N., Severin V. P., Kotsiuba N. V. *Rozrobka informatsiynoi tekhnologii optymizatsii upravlinnya skladnymy dynamichnymy systemamy* [Development of information technology for optimizing the control of complex dynamic systems]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KhPI": sb. nauch. tr. Temat. vyp.: Sistemyy analiz, upravlenie i informatsionnye tekhnologii* [Bulletin of the National Technical University "KhPI": a collection of scientific papers. Thematic issue: System analysis, management and information technology]. Kharkov, NTU "KhPI" Publ., 2020, no. 2 (4), pp. 63–69.

Надійшло (received) 20.04.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Нікуліна Олена Миколаївна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерій Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Коцюба Ніна Вікторівна – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

Бубнов Антон Ігорович – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Нікуліна Елена Николаевна – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Северин Валерий Петрович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Коцюба Нина Викторовна – асистент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

Бубнов Антон Игоревич – студент кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua

Nikulina Olena Mykolaivna – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2938-4215>; e-mail: elniknik02@gmail.com

Severin Valerii Petrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department System Analysis and Information-Analytical Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2969-6780>; e-mail: severinvp@gmail.com

Kotsiuba Nina Viktorivna – Assistant of Department Software Engineering and Management Information Technologies National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0017-7426>; e-mail: kotsuba.nv@gmail.com

Bubnov Anton Ihorovich – student of Department Computer mathematics and data analysis National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6371-6271>; e-mail: Anton.Bubnov@cs.khpi.edu.ua