

УДК 681.5.01:658.5

*Д.Н. Кравцов, А.А. Стопакевич*

Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченка, 1, г. Одесса, 65044

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000

*В статье разработана модель парогенератора ПГВ-1000. Получены разгонные характеристики модели в среде MATLAB Simulink, а также проведено исследование влияния изменения площади поверхности теплообмена на динамические характеристики парогенератора.*

**Ключевые слова:** Математическая модель – Парогенератор – Теплопередача – ПГВ-1000

*Д.М. Кравцов, О.А. Стопакевич*

Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000

*В статті розроблена модель парогенератора ПГВ-1000. Отримані розгінні характеристики моделі в середовищі MATLAB Simulink, а також проведено дослідження впливу зміни площі поверхні теплообміну на динамічні характеристики парогенератора.*

**Ключові слова:** Математична модель – Парогенератор – Теплопередача – ПГВ-1000

*D.N. Kravtsov, A.A. Stopakevich*

Odessa national polytechnic university, ave. Shevchenko, 1, Odessa, 65044

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF STEAM GENERATOR PGV-1000 MODEL

*The article spotlights developing of the steam generator PGV-1000 model. The step responses of the model in the environment MATLAB Simulink were obtained, and the effect of changing the heat transfer surface on the dynamic characteristics of the steam generator was investigated.*

**Keywords:** Mathematical model – Steam generator – Heat transfer – PGV-1000

### I. ВВЕДЕНИЕ

Парогенераторы ПГВ-1000 являются распространенным промышленным энергетическим оборудованием. Из опыта эксплуатации парогенераторов известно, что происходит постепенное уменьшение их поверхности теплообмена, а это в свою очередь приводит к ухудшению экономичности работы оборудования и разбалансировке систем управления. Поэтому исследование влияния изменения площади поверхности теплообмена на динамические характеристики парогенераторов являются актуальной задачей [1, 2, 3].

### II. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИЯ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000

Парогенератор ПГВ-1000 – однокорпусный горизонтальный теплообменник с погружной поверхностью теплообмена, состоящий из горизонтально расположенных труб, со встроенными паросепарационными устройствами, системой раздачи аварийной питательной воды [4].

Корпус ПГ – горизонтальный цилиндрический сосуд, торцы которого с двух сторон закры-

ты эллиптическими днищами. Материал корпуса – легированная конструкционная сталь 10ГН2МФА.

Длина корпуса 13840 мм, внутренний диаметр 4000 мм, толщина стенок в средней части корпуса 145 мм, на концевых участках 105 мм, толщина стенок днища 120 мм.

Коллекторы теплоносителя первого контура предназначены для раздачи теплоносителя первого контура в теплообменные трубы ПГ. «Горячий» и «холодный» коллекторы имеют одинаковое устройство.

Коллектор состоит из двух камер: верхней – конической и нижней – цилиндрической с внутренним диаметром 834 мм и толщиной стенок 171 мм. Коллекторы выполнены из легированной конструкционной стали 10ГН2МФА. Внутренняя поверхность коллекторов, включая крышки фланцевых разъемов, плакированы антикоррозионной наплавкой: 1 слой – 340-8; 2 слой – ЭА 899/216.

Каждый коллектор имеет: переходное кольцо Ду850, для соединения с главным циркуляционным трубопроводами, штуцер Ду20, предназначенный для непрерывной и периодической продувки, два штуцера Ду10 – воздушник и шту-

цер контролю щільності фланцевого з'єднання першого контура.

В верхній частині колектори першого контура мають фланцевий різьом Ду500, снабжений плоскою, при снятті котрої, возможен доступ внутр колектора. Уплотнение кожного фланцевого з'єднання здійснюється з допомогою двох никелевих прокладок, герметичність ущільнень контролюється з допомогою вимірювання тиску в міжпрокладочному просторі (МПП) фланцевих різьом, образованном двумя прокладками. Перетечка серед одного контура в другий не допускається. Герметичність фланцевих з'єднань ПГ контролюється як в процесі розогрева, так і в процесі експлуатації на відсутність течей в контролюємих пологах.

Поверхність теплообмена ПГ виконана із 11000 змеевиків, виготовлених із труб 16×1,5 із аустенітної нержавіючої сталі 08X18H10T. Змеевики скомпоновані в два U-образних пучка, маючих по три вертикальних коридора, для забезпечення устійливої гідродинаміки циркулюючої котлової води. Трубки в пучках розміщені в шахматному порядку з кроком по висоті S1 = 19 мм, по ширині S2 = 23 мм. Конці змеевиків заделываются в стінки колекторів теплоносія шляхом обварки їх торців з антикоррозионним покриттям внутрішніх полостей аргонодуговою зваркою з послідуєщою вальцовкою на всю глибину заделки в колектор методом взрива. Змеевики дистанціонуються в трубному пучку хвилястими і плоскими пластинами із сталі 08X18H10T, котрі в свою чергу закріплюються в опорних конструкціях, розташованих в корпусі ПГ.

В паровому просторі ПГ установлений жалюзийний сепаратор, состоящий із набору пакетів жалюзей. Конструкція пакета включає в себе установлений за жалюзіями паровий дырчатый лист. Пакеты располагаются под углом 26° к вертикали в паровому об'ємі ПГ на висоті около 750 мм від погрузного дырчатого листа. Жалюзі волнообразного профіля виконані із сталі 08X18H10T.

Подвод питательной воды осуществляется через патрубок, расположенный в верхней части корпуса ПГ. К патрубкам питательной воды через проставки с трубой присоединен коллектор Ду400, расположенный в паровом об'ємі ПГ, разветвляющийся на две раздающие трубы Ду250, расположенные над погружным дырчатым листом. Питательная вода подается на "горячую" часть теплообменного пучка под дырчатый лист через 16 раздающих коллекторов Ду80, соединенных раздающими трубами и маючих по длине 38 трубок Ду25 для выхода питательной воды. Материал системы подвода и раздачи питательной воды - сталь марки Ст20. Подвод питательной воды в аварийных режимах при работе на мощности меньшей 7% от номинальной осуществляется через патрубок расположенный на днище. К патрубку присоединен коллектор Ду100 с раздаю-

щими трубами Ду20. Материал патрубка – сталь 08X18H10T.

Для выравнивания паровой нагрузки зеркала испарения в водяном об'ємі ПГ установлен погружной дырчатый лист, который представляет собой набор листов с отверстиями диаметром 13 мм на металлической раме. Живое сечение дырчатого листа для прохода пара составляет около 8%.

Пароотводящая система включает в себя 10 патрубков Ду350 із сталі 22К. Патрубки з допомогою переходників із сталі 20 з'єднані в обшій паровий колектор Ду600 із сталі 16ГС.

### III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРОГЕНЕРАТОРА

Исходными данными для разработки модели динамики парогенератора являются:

Расход пара,  $D_p = 408$  кг/с.

Давление генерируемого пара,  $p_{10} = 6.27$  МПа.

Давление на входе в парогенератор,  $p_0 = 5.9$  МПа

Температура генерируемого пара,  $t_0 = 280^\circ\text{C}$ .

Температура питательной воды,  $t_{10} = 220^\circ\text{C}$ .

Теплоемкость металла,  $c_m = 460$  Дж/кг·К.

Теплоемкость питательной воды,  $c_w = 4600$  Дж/кг·К.

Масса металла,  $G_M = 72000$  кг.

Масса воды в парогенераторе,  $G_B = 32950$  кг.

Коэффициент теплопередачи,  $\alpha_{B0} = 4.458 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2\text{К}}$ .

Площадь поверхности теплообмена,  $H_B = 6115$  м<sup>2</sup>.

Плотность воды при  $t = 280^\circ\text{C}$ ,  $\rho_0 = 750.7$  кг/м<sup>3</sup>.

Введем следующие обозначения для комплексов режимных и конструктивных параметров [5]:

$$L_B = \frac{D_{B0} c_B}{\alpha_{B0} H_B} = 69;$$

$$T_B = \frac{G_B c_B}{\alpha_{B0} H_B} = 5516;$$

$$T_M = \frac{G_M c_M}{\alpha_{B0} H_B} = 1200;$$

$$K_B = -L_B \frac{t_0 - t_{10}}{D_{B0}} = -10.7;$$

$$\bar{\chi} = \frac{p_{10} - p_0}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial t} = 1989;$$

$$\chi = 2.215;$$

$$d_0 = \frac{1}{(2\xi + 1)T_M} = \frac{1}{1234};$$

$$c_0 = \frac{1}{2\xi T_B} = 0.00625;$$

$$\xi = \frac{1}{L_B} = 0.0145;$$

$$v = 0.2T_M = 240;$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0.1736;$$

Математическая модель парогенератора как объекта с сосредоточенными параметрами задается следующими передаточными функциями (рисунки 1):

$$W_{tt_1} = \frac{T_M s + 1}{\Lambda(s)};$$

$$W_{td_{B1}} = \frac{\xi K_B (v s + 1)}{\Lambda(s)};$$

$$W_{pt_1} = 2\bar{\chi} \frac{(s + \alpha_0)(s + c_0) \cdot \xi T_M T_B}{\Lambda(s)};$$

$$W_{pD_{B1}} = \frac{2\bar{\chi}\xi K_B (s + c_0) \cdot \xi T_M T_B}{T_M \Lambda(s)};$$

$\Lambda(s)$ - общий знаменатель передаточных функций.

$$\Lambda(s) = \xi T_M T_B s + [\xi(T_M + T_B) + T_M]s + 1$$

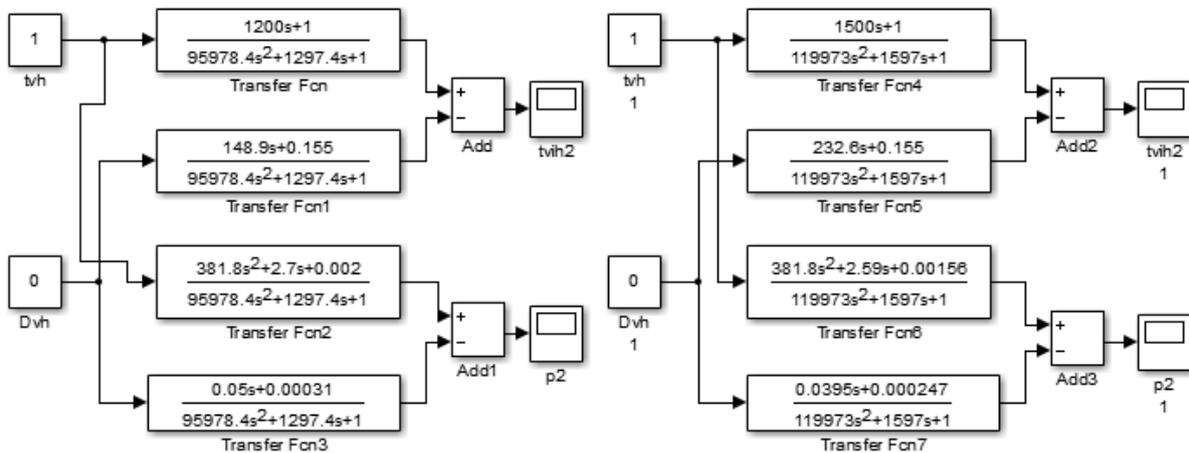


Рисунок 1 – Структурные схемы математической модели парогенератора при номинальной и уменьшенной на 20% площади поверхности теплообмена

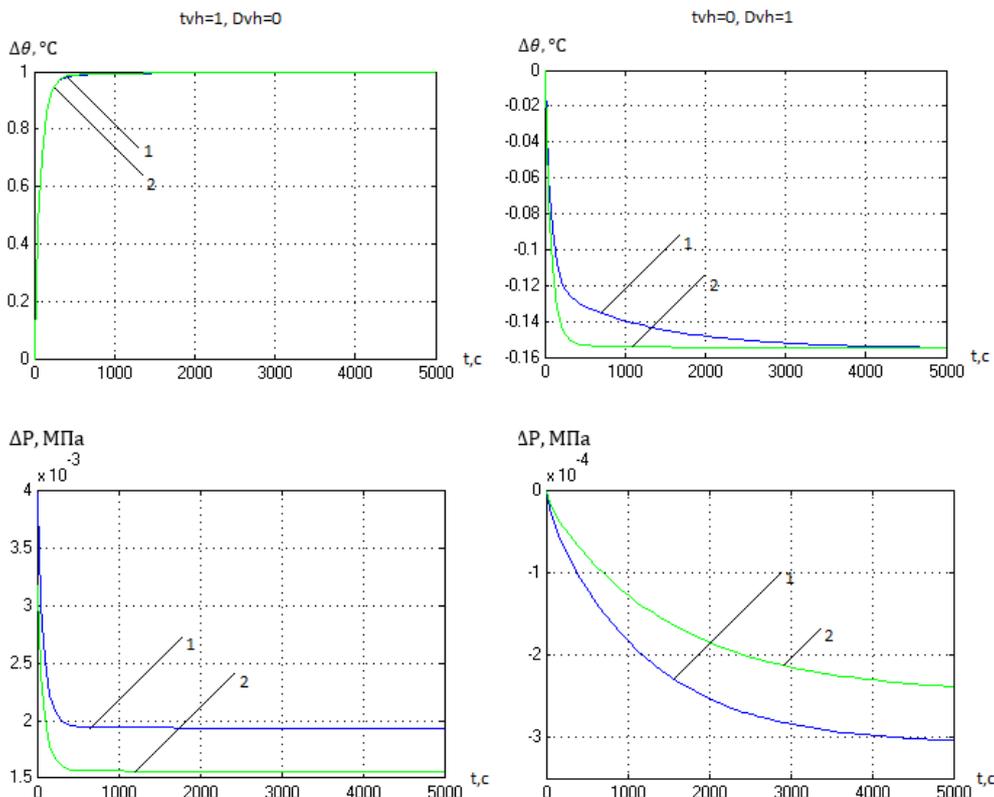


Рисунок 2 – Разгонные характеристики парогенераторов ( 1- парогенератор с номинальной площадью поверхности теплообмена , 2- парогенератор с пониженной площадью поверхности теплообмена)

#### IV. ВЫВОДЫ

Получена математическая модель динамики парогенератора ПГВ-1000 по каналу температуры и расход нагреваемой среды – температуры и давления пара.

Из рассмотрения графиков (рисунок 2) видно, что инерционность процессов при уменьшении площади поверхности теплообмена в пределах 20% уменьшилась. Однако из анализа передаточных функций видно, что постоянная времени знаменателя передаточных функций увеличилась. Знаменатель передаточной функции модели парогенератора с номинальной поверхностью теплообмена может быть представлен как последовательное соединение двух инерционных звеньев с постоянными времени  $T_1 = 78.7$  с,  $T_2 = 1218$  с. Знаменатель передаточной функции модели парогенератора с уменьшенной поверхностью теплообмена имеет постоянные времени  $T_1 = 79$  с,  $T_2 = 1518$  с. Несмотря на то, что общая инерционность парогенераторов как и ожидалось растет происходит эффект компенсации инерционности за счет дифференцирующих свойств, т.е. взаимная компенсация нуля и полюса передаточной функции. За счет этого инерционность процессов получается более низкой, чем могла бы быть если бы не было этих свойств. При дальнейшем уменьшении площади поверхности теплообмена и коэффициента теплопередачи следует ожидать, что полюса сильно разойдутся и инерционность парогенератора резко повысится.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Пелых С.Н.** Комплексный критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме / **С.Н. Пелых, В.Е. Баскаков, Т.В. Цисельская** // Тр. Одес. политехн. ун-та.– 2009. – Вып. 2. – С. 53-58.

2. **Pelykh S.N.** Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / **S.N. Pelykh, M.V. Maksimov** // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, № 8. – P. 2956-2963.

3. **Pelykh S.N.** A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / **S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, G.T. Parks** // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 257, № 4. – P. 53-60.

4. **Рассохин Н.Х.** Парогенерирующие установки.– М.: Энергоиздат, 1987

5. **Серов Е.П., Корольков Б.П.** Динамика парогенераторов.– М.: Энергия, 1972

#### REFERENCES

1. **Pelykh S.N.** Kompleksnyi kriteriy effektivnosti algoritma manevrirovania moshnosti RU s VVER-1000 v peremennom rejime / **S.N. Pelych, V.E. Baskakov, T.V. Tsyselskaya** // Tr. Odes. polytekhn. un-ta. – 2009. – Vyp.2. – S.53-58.

2. **Pelykh S.N.** Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / **S.N. Pelykh, M.V. Maksimov** // Nuclear Engineering and Design. – 2011. – Vol. 241, № 8. – P. 2956-2963.

3. **Pelykh S.N.** A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup / **S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, G.T. Parks** // Nuclear Engineering and Design. – 2013. – Vol. 257, № 4. – P. 53-60.

4. **Rassohin N.H.** Parogeneriruiushie ustanovki. – М.: Energoizdat, 1987

5. **Serov E.P., Korolkov B.P.** Dynamika parogeneratorov. – М.: Energia, 1972

---

Получена в редакции 09.10.2013, принята к печати 14.10.2013