

**Біряк В.В.**

Одеський національний політехнічний університет

## РОЗРАХУНОК ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТРУБОПРОВОДУ ВІД ПНТ-4 ДО ПНТ-3 ПО ВИТРАТІ КОНДЕНСАТУ В ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВт ЗАПОРІЗЬКОЇ АЕС

*Об'єктом проектування є технологічна ділянка групи ПНТ, що входить у другий контур енергоблоку АЕС. Розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату в групі підігрівачів низького тиску енергоблоку 1000 МВт Запорізької АЕС. У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується система регенерації низького тиску. Ця система призначена для підігріву основного конденсату, що подається конденсаційними насосами з головного конденсатора в деаератори. Застосування ПНТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.*

**Ключові слова:** автоматична система регулювання, АЕС, підігрівач низького тиску, ВВЕР-1000, динамічні властивості трубопроводу.

**Вступ.** У тепловій схемі атомної електростанції з реактором типу ВВЕР-1000 застосовується система регенерації низького тиску. Ця система призначена для підігріву основного конденсату, що подається конденсаційними насосами з головного конденсатора в деаератори. Застосування ПНТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС.

Підігрів основного конденсату в ПНТ здійснюється через поверхню трубної системи.

Для запобігання аварійних ситуацій на АЕС необхідно регулювати рівень конденсату, який подається в ПНТ, і в даному проекті розроблена система управління з використанням датчиків, виконавчих механізмів і регулятора.

Регульованим параметром в групі ПНТ є рівень конденсату (дренажу), який утворюється в результаті нагрівання основного конденсату. Підвищення або зниження рівня дренажу може привести до аварії на атомній електростанції. Рівень конденсату гріючої пари є важливим складником процесу управління, оскільки пар на нагрів береться з не контрольованих відборів проточної частини турбіни. Тому метою даного проекту є розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату.

**Опис об'єкта автоматизації.** В реакторній установці використовуються регенеративні підігрівачі поверхневого типу, тобто такі, в яких гріюче середовище (пар відбору турбіни) відокремлене від нагриваючого (вода конденсатно-живильного тракту). Пар конденсується в підігрівачі низького тиску (ПНТ) та у вигляді води (так званий дренаж) відводиться на попередній

по ходу ПНТ. З першого після конденсатора підігрівача (ПНТ) дренаж зливається в конденсатор. Така схема отримала назву каскадний злив дренажів.

За каскадного зливу дренажів повинен бути забезпечений відвід тільки конденсату. Не сконденсований в підігрівачі пар може по дренажному трубопроводу надходити в попередній підігрівач. Рівень конденсату в підігрівачах також повинен бути визначеним. Оскільки регенеративний підігрів води в тракці здійснюється шляхом конденсації пари на стінках труб, то при підвищенні рівня конденсату частина поверхні, залита водою, не бере участі в теплообміні і виключається можливість підігріву води до певного рівня, що визначається оптимальною розбивкою підігріву по ступеням.

Поверхневі регенеративні підігрівачі виконані вертикальними. Вертикальні підігрівачі найбільш зручні під час компонування обладнання в машинному залі. Крім того, конденсуюча пара утворює плівку на теплообмінній поверхні і якщо вона вертикальна, то полегшується відведення плівки конденсату, що підвищує коефіцієнт теплопередачі і зменшує теплообмінну поверхню.

Для конденсатного тракту, тобто для ПНТ, характерні відносно низькі температури, коли корозійні процеси протікають досить інтенсивно.

Крім того, в конденсаті, що підігривається, містяться корозійно-агресивні гази – кисень і вуглекислота, що сприяють посиленню корозійних процесів. З цих причин матеріал поверхні теплообміну ПНТ повинен виготовлятися з корозійностійких аустенітних нержавіючих сталей, високо-

нікелевих сплавів. Конструкція і принцип дії. Підігрівач низького тиску являє собою вертикальний кожухотрубний теплообмінник з гладкими прямими трубками поверхні теплообміну. Число ходів основного конденсату – чотири, це означає, що під час руху основний конденсат проходить по висоті підігрівача чотири рази. Пройшовши по частині трубок вниз, він розвертається і йде за іншими трубками вгору і так далі. Основними вузлами підігрівача є:

- корпус, що складається з основної обичайки і приварених до неї зовнішнього кожуха днища з опорою. На верхньому торці обичайки мається приварний фланець, у верхній частині обичайки (під кожухом) є ряд отворів великого діаметру для проходу гріє пара до трубної системи. За розташування патрубків підведення в нижній частині зовнішнього корпусу, така конструкція є більш надійною від закидання води в турбіну під час розриву трубок в ПНТ. Матеріал корпусу сталь 12X18H10T;

- виймальна частина, що складається з трубної системи з нижньою водяною камерою, проміжної обичайки і верхньої водяною камери;

- трубна система, що складається з пучка прямих труб Ø16x1 развальцованих і обварених в двох трубних дошках. Додаткове кріплення трубок в пучку здійснюється за допомогою перегородок типу диск-кілець, які служать також для організації руху парового потоку в міжтрубному просторі. Нижня водяна камера являє собою еліптичне днище з ввареною в нього (по діагоналі) перегородкою. Проміжна обичайка своїм нижнім фланцем кріпиться до фланця основної обичайки корпусу. До верхнього фланця проміжної обичайки кріпиться фланець верхньої водяної камери;

- верхня водяна камера складається із зварених між собою днища і обичайки. Для напряму руху потоку основного конденсату по ходам трубного пучка в камері закріплена Т-образна перегородка. Для підвищення герметичності фланцеві з'єднання зварюються. Зварений шов малого катета накладається на спеціальні елементи-губки, які є частиною кожного фланця.

Під час проведення ремонтних робіт, пов'язаних із зняттям водяних камер або трубної системи, зварений шов видаляється, а під час складання накладається знову. Після декількох подібних операцій замість губок, зрізаних разом зі швами, до фланців приварюються металеві прокладки-мембрани, за якими в подальшому проводиться заварка фланцевого роз'єму. Матеріал виймальної частини – сталь 09X18H10T.

ПНТ призначений для підігріву основного конденсату паром, який надходить з відбору турбіни. Дренаж гріючого пара відводиться самопливом в паровий простір попереднього ПНТ або подається за допомогою насоса в основну лінію. Величина підігріву визначається параметрами пара з нерегульованих відборів. Єдиною регульованою величиною є рівень дренажу.

За підвищення рівня затоплюються поверхні теплообміну. В процесі аварійного розвантаження енергоблока тиск пара різко зменшується, що призводить до закипання дренажу і можливості попадання його в турбіну. За низького рівня конденсату можливе проскакування пара в нижчий підігрівач, що зменшує ККД або в дренажний насос, що приводить до кавітації.

Динамічні властивості ПНТ описуються рівнянням інтегруючої ланки. З цієї причини для регулювання рівня використовують П-закон регулювання. Для поліпшення процесу регулювання в ПНТ між регулятором встановлюють пристрої динамічного зв'язку. Властивості динамічної ланки визначаються умовою інваріантності. Схема регулювання представлена на рисунку 1.

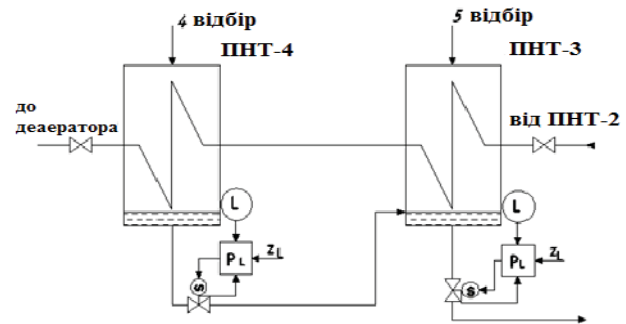


Рис. 1. Схема регулювання рівня в групі ПНТ

Розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату. Втрати тиску по довжині трубопроводу (без теплообмінників)

$$\Delta P_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{вн}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{\rho \omega^2}{2} \quad (1)$$

де,  $\lambda$  – коефіцієнт тертя (Дарсі);  $\zeta_i$  - коефіцієнт місцевих опорів;  $D_{вн}$  – внутрішній діаметр трубопроводу;  $\omega$  – швидкість рідини;  $\rho$  – щільність рідини.

Якщо в (1) виразити швидкість через масову витрату  $M$ , то

$$\Delta P_L = \left( \frac{\lambda L}{D_{вн}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{M^2}{2 \rho S_{тр}^2} \quad (2)$$

де,  $S_{тр}$  – площа поперечного перерізу трубопроводу.

Або

$$\Delta P_L = K_L M^2 \quad (3)$$

$$= \left( \frac{\lambda L}{D_{вн}} + \sum_{i=1}^n \zeta_i \right) \frac{1}{2 \rho S_{тр}^2} \quad (4)$$

$$K_L = \left( \frac{0,032 \cdot 5}{0,2} + (1 + 0,5 + 1 + 1 + 2) \right) \cdot \frac{1}{2 \cdot 982,6 \cdot 0,031^2} = 3,33 \frac{1}{\text{кгм}}$$

Коефіцієнт тертя  $\lambda$  можна визначити за формулою А.Д. Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{K_s}{D_{вн}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \quad (5)$$

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{0,5}{200} + \frac{68}{15319,15} \right)^{0,25} = 0,032$$

де, еквівалентна шорсткість  $K_s$  знаходиться в діапазоні 0,01-0,7 мм (для труб нових і заржавілих відповідно). В цьому разі величину  $D_{вн}$  (3.5) слід виразити в міліметрах.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{\dot{E} D_{вн}}{A} \quad (6)$$

$$Re = \frac{1,8 \cdot 0,2}{0,0000235} = 15319,15$$

де, швидкість  $\omega$  виражається в м/с, кінематична в'язкість в м<sup>2</sup>/с, динамічна в'язкість  $\mu$  в кгс\*с/м<sup>2</sup>, масова витрата  $M$  в кг/год, внутрішній діаметр в мм. У втрати тиску в трубопроводі, розраховані по (1) або (2), не входять втрати в регенеративних підігрівачах, тому

$$\Delta P_L^{\Sigma} = \Delta P_L \quad (7)$$

Тоді коефіцієнт для трубопроводу, що розраховується, відповідно до (3)

$$\Delta P_L^{\Sigma} = \Delta K_L \cdot M^2 \quad (8)$$

$$\Delta P_L^{\Sigma} = 3,33 \cdot 55,34^2 = 10198,18 \frac{\text{кг}}{\text{мс}^2} = 0,01019 \text{ МПа}$$

Розглянемо наближений вибір РК, придатний для цілей даного завдання, оскільки точний конструктивний розрахунок РК не є метою даної роботи.

Перепад тиску в системі на вході і виході трубопроводу

$$\Delta P_c = P_a - P_e \quad (9)$$

$$\Delta P_c = 0,541 - 0,287 = 0,25 \text{ МПа}$$

де,  $\Delta P_z = z \rho g$  втрата тиску внаслідок різниці висот початкової та кінцевої відміток конденсатору.

У цій схемі трубопроводу знак «-». Тоді необхідний перепад тиску на регулюючому клапані  $\Delta P_{рк}^{mp}$  за максимальної витрати з урахуванням розрахованих втрат в лінії

$$\Delta P_{рк}^{tp} = \Delta P_c - \Delta P_L \quad (10)$$

$$\Delta P_{рк}^{tp} = 0,25 - 0,0101 = 0,239 \text{ МПа}$$

Тип РК вибирається залежно від тиску і температури середовища, перепад тиску на клапані за його повного відкриття та інших властивостей і вимог. У таблиці 1 наведені основні типи РК, що використовуються на АЕС за різних умовних тисках  $P_y$  середовища.

Таблиця 1

Тиск в різних регулюючих клапанах

$P_y$ , МПа	Тип РК
$\leq 2,5$	Поворотно-золотниковий кутовий;
4,0; 6,4; 10,0	Голчастий прохідний, поворотно-золотниковий, прохідний;
20,0 и более	Голчастий кутовий, шиберний

Коефіцієнт пропускної здатності клапана, м<sup>3</sup>/год (11)

де,  $M$  – витрата середовища, кг/год;  $\Delta P_{рк1л}$  – перепад тиску на клапані за повного відкриття, МПа;  $\rho$  – щільність середовища кг/м<sup>3</sup>.

Значення  $K_v$  чисельно дорівнює витраті м<sup>3</sup>/год несжимаємої рідини з щільністю 1000 кг/м<sup>3</sup>, що проходить через РК за перепаду тиску на ньому 0,098 МПа.

$$K_v = 0,99 \cdot 10^{-2} \frac{199224}{\sqrt{0,098 \cdot 1000}} = 199,22$$

Залежно від розрахованого  $K_v$  визначають діаметр умовного проходу клапана  $D_y$ .

Розраховують площу  $S_y$ , м<sup>2</sup>, вхідного патрубка РК

$$S_y = \frac{\pi D_y^2}{4} \cdot 10^{-4} \quad (12)$$

Потім розраховують площу регульованого прохідного перерізу РК за повного його відкриття

$$S_{рк1} = 10^{-4} \frac{K_v}{5,04 \mu} \quad (13)$$

$$S_{рк1} = \frac{199,22}{5,04 \cdot 0,6} \cdot 10^{-4} = 0,066 \text{ м}^2$$

де,  $\alpha$  – коефіцієнт витрати клапана обраного типу за повного відкриття.

Коефіцієнт витрати  $\mu$  при повному відкритті має наступні значення:

- шиберні клапани 0,7 или 0,8;
- поворотно-золотникові 0,6;
- голчасті прохідні 0,6.

Отримане значення  $S_{рк1}$  використовується для розрахунку коефіцієнтів:

$$K_{рк} = \frac{1}{\mu^2 2 \rho} = \frac{\zeta_{рк}}{2 \rho} \quad (14)$$

$$K_{рк} = \frac{1}{\mu^2 2 \rho} = \frac{1}{0,6^2 \cdot 2 \cdot 982,6} = 0,0014 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$\alpha_{\text{рк}} = \left( \frac{\delta \Delta P}{\delta M} \right) = \frac{2K_{\text{рк}} \bar{M}}{S_{\text{рк}}^2}; \quad (15)$$

$$a_{\text{рк}} = \left( \frac{\partial \Delta P}{\partial H} \right) = \frac{2K_{\text{рк}} M}{S_{\text{рк}}^2} = \frac{2 * 0,0014 * 55,34}{0,066^2} = 35,57$$

$$b_{\text{рк}} = \frac{2K_{\text{рк}} \bar{M}^2}{S_{\text{рк}}^3} \quad (16)$$

$$b_{\text{рк}} = \frac{2K_{\text{рк}} * M^2}{S_{\text{рк}}^3} = \frac{2 * 0,0014 * 55,34^2}{0,066^3} = 29826,65$$

$$\alpha_{\text{л}} = 2K_{\text{л}} \bar{M} \quad (17)$$

$$a_{\text{л}} = 2 * 3,33 * 55,34 = 368,56$$

Постійна часу трубопроводу

$$T = \frac{K_y}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{рк}}}, \quad (18)$$

$$T = \frac{161,29}{404,13} = 0,4 \text{ с}$$

$$K_y = \frac{L}{S_{\text{мп}}} \quad (19)$$

$$K_y = \frac{5}{0,031} = 161,29 \frac{1}{\text{м}}$$

Коефіцієнт передачі по каналу «площа прохідного перерізу клапана-витрата»

$$K_{S_{\text{рк}}-M} = \frac{b_{\text{рк}}}{\alpha_{\text{л}} + \alpha_{\text{рк}}} \quad (20)$$

$$K_{S_{\text{рк}}-M} = \frac{29826,65}{404,13} = 73,8$$

Результати. Виведення рівняння буде здійснюватися для ПНТ з регулюючим органом на стоці, який зображений на рисунку 2.

Скористаємося рівнянням динаміки

$$F_3 \rho \frac{d\Delta L}{dt} = \Delta M_{\text{п}} - \Delta M_{\text{к}} \quad (21)$$

Для розглянутого випадку витрата конденсату через зливний регулюючий клапан визначається прохідним перерізом клапана  $S_{\text{кл}}$  і перепадом тиску на ньому  $\Delta P_{\text{кл}}$ , а саме:

$$M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho \Delta P_{\text{кл}}}, \quad (22)$$

де,  $\mu$  - коефіцієнт витрати клапана;  $\rho$  - щільність конденсату.

$$\text{Таким чином, } M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho \Delta P_{\text{кл}}},$$

Своєю чергою перепад тиску на клапані  $\Delta P_{\text{кл}}$  визначається;

$$\begin{aligned} & - \text{для вільного зливу конденсату} \\ & - \Delta P_{\text{кл}} = L\rho g \end{aligned} \quad (23)$$

де,  $L$  - рівень конденсату;  
- для підігрівача під тиском

$$\Delta P_{\text{кл}} = L\rho g + \Delta P, \quad (24)$$

де,  $\Delta P$  - різниця тисків, під якими знаходиться теплообмінник.

Прийнявши для розгляду даний випадок, підставимо (24) в (22)

$$M_{\text{к}} = \mu S_{\text{кл}} \sqrt{2\rho(L\rho g + \Delta P)} \quad (25)$$

Отримана функція є нелінійною. Для отримання приросту функції  $M_{\text{к}} = f(S_{\text{кл}}, \Delta P_{\text{кл}})$  скористаємося розкладанням функції в ряд Тейлора, залишаючи тільки лінійні члени.

$$\Delta M_{\text{к}} = \left( \frac{\delta M_{\text{к}}}{\delta S_{\text{кл}}} \right) \Delta S_{\text{кл}} + \left( \frac{\delta M_{\text{к}}}{\delta \Delta P_{\text{кл}}} \right) \Delta P_{\text{кл}} \quad (3.26)$$

З урахуванням цих умов одержуємо:

$$\begin{aligned} & \frac{F_3 \cdot \sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho g S_{\text{кл}}} \cdot \frac{d\Delta L}{dt} + \Delta L = \\ & = \frac{\sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho^2 g S_{\text{кл}}} \cdot \Delta M - \frac{2 \cdot (L\rho g + \Delta P)}{\rho g S_{\text{кл}}} \cdot \Delta S_{\text{кл}} \\ & \frac{F_3 \cdot \sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{5,47 \cdot \sqrt{2 \cdot 982,6 \cdot (982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,545 + 250000)}}{0,6 \cdot 982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,006} = 3260 \\ & \frac{\sqrt{2\rho \cdot (\rho g L + \Delta P)}}{\mu \rho^2 g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{\sqrt{2 \cdot 982,6 \cdot (982,6 \cdot 9,81 \cdot 0,545 + 250000)}}{0,6 \cdot 982,6^2 \cdot 9,81 \cdot 0,006} = 0,607 \\ & \frac{-2 \cdot (L\rho g + \Delta P)}{\rho g S_{\text{кл}}} = \\ & = \frac{2 \cdot (982,6 \cdot 9,81 + 250000)}{982,6 \cdot 90,545,81 \cdot 0,006} = -8833 \end{aligned}$$

Внутрішній діаметр трубопроводу:

$$d_{\text{вн}} = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м}$$

Швидкість конденсату:  $V_{\text{конд.}} = 1,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$$\text{Площа: } S = \frac{\pi d}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} = 0,031 \text{ м}^2$$

Номінальна витрата води:  $Q_{\text{води}} = 199,24 \frac{\text{т}}{\text{ч}}$

Площа дзеркала випаровування:  $F_3 = 5,47 \text{ м}^2$

Номінальний рівень:  $L = 0,545 \text{ м}$

Щільність конденсату:  $Q_{\text{води}} = 982,6 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

**Висновок.** Було розглянуто технологічний об'єкт регулювання такий, як група ПНТ, яка застосовується на АЕС з реактором ВВЕР-1000. Також були розглянуті варіанти трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату. Була складена функціональна схема регулювання рівня в групі ПНТ.

В результаті роботи був проведений розрахунок динамічних властивостей трубопроводу від ПНТ-4 до ПНТ-3 по витраті конденсату.

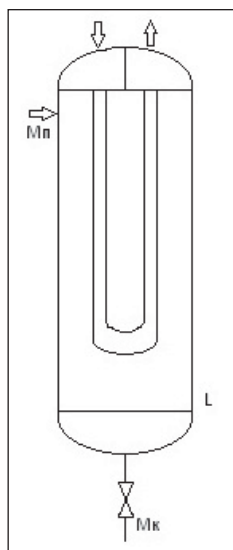


Рис. 2. Теплообмінник без насоса на стоці

**Список літератури:**

1. Преображенський В.П. Теплотехнічні вимірювання та прилади: підручник для вузів за фахом «Автоматизація теплоенергетичних процесів». 3-е изд., Перераб. М.: «Енергія», 1978. 704 с.
2. Демченко В.А. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Автоматизація безперервних технологічних процесів» для студентів спеціальності 7.09.250. Одеса: ОДПУ, 2000. 34 с.
3. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС. Одеса: «Асторпрінт», 2001. 305 с.
4. Проектування систем автоматизації технологічних процесів. А.С. Ключев, Б.В. Глазов, А.Х. Дубровській. М.: Вища школа, 1990. 464 с.

**РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТРУБОПРОВОДА ОТ ПНД-4 ПНД-3 ПО РАСХОДУ КОНДЕНСАТА В ГРУППЕ ПНД ЭНЕРГОБЛОКА 1000 МВт ЗАПОРОЖСКОЙ АЭС**

*Объектом проектирования является технологический участок группы ПНД, входящей во второй контур энергоблока АЭС. Расчет динамических свойств трубопровода от ПНД-4 в ПНД-3 по расходу конденсата в группе подогревателей низкого давления энергоблока 1000 МВт Запорожской АЭС. В тепловой схеме атомной электростанции с реактором типа ВВЭР-1000 применяется система регенерации низкого давления. Эта система предназначена для подогрева основного конденсата, подаваемого конденсационными насосами с главного конденсатора у деаэратора. Применение ПНД повышает КПД установки и существенно влияет на безопасность и надежность АЭС.*

**Ключевые слова:** автоматическая система регулирования, АЭС, подогреватель низкого давления, ВВЭР-1000, динамические свойства трубопровода.

**CALCULATION OF DYNAMIC PROPERTIES OF PIPELINE FROM LPH-4 TO LPH-3 BY CONSUMPTION COSTS IN A GROUP OF LOW PRESSURE OF THE 1000 MW ZAPORIZHIA NUCLEAR POWER PLANT**

*The object of the design is the technological area of the group of low pressure heater, which is included in the second circuit of the NPP power unit. Calculation of the dynamic properties of the pipeline from the low pressure heater-4 to the low-pressure heater-3 by the consumption of condensate in the group of low pressure heaters of the 1000 MW unit of the Zaporizhzhya NPP. In the thermal scheme of a nuclear power plant with a WWER-1000 reactor, a low-pressure regeneration system is used. This system is intended for the heating of the main condensate, which is fed by condensation pumps from the main condenser to the deaerator. The use of a low pressure heater increases the efficiency of the installation and significantly affects the safety and reliability of the NPP.*

**Key words:** automatic control system, NPP, low pressure heater, VVER-1000, dynamic properties of the pipeline.