

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Теплоенергетичний факультет  
Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

„ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ПРОЦЕСИ В ЕНЕРГЕТИЧНИХ  
УСТАНОВКАХ”

Методичні вказівки  
до виконання розрахункової роботи  
на тему «Теплогідравлічний розрахунок реактора типу РБМК-1000»  
для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика»,  
програми професійного спрямування «Теплофізика»

Київ  
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

2016

Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках: Методичні вказівки до виконання розрахункової роботи на тему «Теплогідравлічний розрахунок реактора типу РБМК-1000» для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика», програми професійного спрямування «Теплофізика» денної форми навчання/ Уклад.: В.Ю.Кравець, Є.С. Алексеїк, О.С.Алексеїк – К.: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2016. – 32 с.

*Гриф надано вченою радою ТЕФ  
(протокол № 4 від 28 листопада 2016 р.)*

## Електронне навчальне видання

„Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках ”

Методичні вказівки

до виконання розрахункової роботи

на тему «Теплогідравлічний розрахунок реактора типу РБМК-1000»

для студентів напряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика»,

програми професійного спрямування «Теплофізика»

Укладачі: *Кравець Володимир Юрійович, к.т.н., доц.  
Алексеїк Євгеній Сергійович, к.т.н., ас.  
Алексеїк Ольга Сергіївна, ас.*

Відповідальний редактор: *Коньшин В.І., к.т.н., доц.*

Рецензент: *Фуртат І.Е., к.т.н., доц.*

*За редакцією укладачів*

## ВСТУП

Методичні вказівки призначені для виконання розрахункової роботи з курсу «Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках», змістом якої є теплогідравлічний розрахунок каналу активної зони ядерного реактора типу РБМК-1000. Розрахунок проводиться, виходячи з заданої геометрії, тепловго навантаження та параметрів теплоносія.

В цілому розрізняють перевірочний та конструкційний розрахунки активної зони ядерного реактора. Метою перевірочного розрахунку є перевірка можливості використання вже існуючої конструкції активної зони в заданих умовах. Метою конструкційного розрахунку є визначення геометричних та конструктивних параметрів активної зони для заданих умов. Методика розрахунку, що викладена в даних методичних вказівках відноситься до перевірочних розрахунків.

### МЕТА ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Метою виконання розрахункової роботи є формування у студентів здатностей аналізувати теплогідравлічні процеси в парогенеруючих каналах; визначати і аналізувати теплогідравлічні параметри двофазних потоків в парогенеруючих каналах енергетичного обладнання, використовуючи методики розрахунків прямотокових елементів енергетичних установок за геометричними характеристиками і тепловим навантаженням.

### РЕЙТИНГОВА СИСТЕМА ОЦІНЮВАННЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

За успішне виконання та захист розрахункової роботи передбачено максимум 30 балів в загальному рейтингу студента з кредитного модуля «Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках». З них:

- 10 балів – за виконання розрахункової роботи протягом семестру;
- 20 балів – за захист розрахункової роботи наприкінці семестру.

В розрахунковій роботі виділяється 6 етапів розрахунку:

1. Розрахунок геометричних параметрів активної зони.
2. Розрахунок витрати теплоносія та його швидкості. Визначення розподілу густин теплових потоків по висоті тепловиділяючої збірки (ТВЗ).
3. Визначення границі економайзерної ділянки.
4. Визначення розподілу локальних коефіцієнтів тепловіддачі по висоті активної зони. Розрахунок температур оболонки тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ). Розрахунок запасу до кризи тепловіддачі.
5. Розрахунок гідравлічного опору економайзерної ділянки.
6. Розрахунок гідравлічного опору ділянки кипіння.

Своєчасне і правильне виконання кожного з даних етапів оцінюється в 5 балів. Строки задачі кожного етапу визначаються викладачем на початку семестру. Наприкінці семестру сума балів, набрана студентом за виконання розрахункової роботи ділиться на ваговий коефіцієнт 3. Отриманий результат заноситься до загального рейтингу студента з даного кредитного модуля. За кожні два тижні запізнення зі здачею етапу оцінка за даний етап знижується на 1 бал, але не знижується нижче 1 балу. У разі дострокової здачі етапу до оцінки може бути додано 1 бонусний бал.

Після успішної здачі всіх етапів та оформлення розрахункової роботи проводиться її захист. Максимальна кількість балів за захист роботи – 20. Критерії оцінювання захисту розрахункової роботи наступні:

- “відмінно”, повна відповідь (не менше 90% потрібної інформації) – 20 балів;
- “добре”, достатньо повна відповідь (не менше 75% потрібної інформації) – 17 балів;
- “задовільно”, неповна відповідь (не менше 60% потрібної інформації) – 13 балів;

-“незадовільно”, незадовільна відповідь – 0 балів.

Студенти, що не захистили розрахункову роботу або мають стартовий рейтинг менше 23 балів до складання екзамену з кредитного модуля не допускаються.

## СТРУКТУРА РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Розрахункова робота повинна містити:

1. Титульну сторінку (приклад оформлення див. додаток А).
2. Вихідні дані до розрахунку згідно варіанту студента.
3. Опис кожного етапу розрахунку, який містить: всі формули, що використовуються при проведенні розрахунку; підстановку числових значень всіх величин, що входять до формул; результат розрахунку по кожній з формул та його розмірність; представлення результатів розрахунку у вигляді графіку, якщо це необхідно (див. методичку розрахунку по кожному етапу, приведену нижче).
4. Висновки по розрахунку, щодо можливості роботи реактора із заданими згідно варіанту параметрами у заданих умовах. Оцінка можливості роботи проводиться на основі аналізу результатів проведених розрахунків. Висновки є обов'язковою частиною розрахункової роботи. Роботи без висновків до захисту не допускаються.

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ РОБОТИ

Розрахункова робота оформлюється на стандартних аркушах формату А4 без рамок виключно рукописним способом.

Кожен етап розрахунку повинен починатись з нової сторінки. Висновки також слід починати з нової сторінки. Змістом кожного етапу є опис

розрахунків та графіки, що відображають результати розрахунків (де це потрібно). Опис розрахунків може бути оформлений, наприклад, таким чином:

«Об'єм активної зони ядерного реактора розраховується за виразом:

$$V_{\text{аз}} = \frac{Q_{\text{т}}}{q_{\text{v0}}}$$

Підставивши в даний вираз значення теплової потужності  $Q_{\text{т}}$  та питомого енерговиділення  $q_{\text{v0}}$ , задані у якості вихідних даних, отримуємо:

$$V_{\text{аз}} = \frac{3000}{5} = 600 [\text{м}^3]. \text{»}$$

Графіки можуть бути накреслені як на звичайних аркушах А4 так і на міліметровому папері. Осі графіків обов'язково мають бути підписані, також на них повинен бути відмічений масштаб. Підписи осей мають містити позначення величин, що на них відкладаються, розмірність цих величин, а також їх порядок (якщо це необхідно). Якщо на графіку зображено більше, ніж один ряд даних, то ряди повинні візуально відрізнитись між собою. Для цього їх можна позначати різними кольорами, використовувати різні фігури (коло, квадрат, трикутник і т.д.) для позначення точок та різні види ліній (ціла, пунктирна, штрих-пунктирна і т.д.). Ряди даних обов'язково мають бути підписані.

Сторінки розрахункової роботи, окрім титульної, повинні бути пронумеровані.

## 1 ВИХІДНІ ДАНІ ДО РОЗРАХУНКУ

Вихідні дані до теплогідравлічного розрахунку можна розподілити на два блоки. До першого блоку входять дані спільні для всіх варіантів, а саме:

Внутрішній діаметр корпусу тепловиділяючої збірки (ТВЗ):  $d_{ТВЗ}^{ВН} = 78$  мм (див. рис. 1.1);

Зовнішній діаметр корпусу ТВЗ:  $d_{ТВЗ}^3 = 86$  мм (див. рис. 1.1);

Кількість ТВЕЛів у збірці:  $n=18$ ;

Кількість технологічних каналів:  $n_{ТК}=1693$ ;

Параметри теплоносія (тиск  $P_{ВХ}$  та температура  $t_{ВХ}$ ) на вході в активну зону (АЗ): 8 МПа; 265 °С;

Тиск теплоносія на виході з АЗ реактора в першому наближенні: 6,4 МПа;

Матеріал оболонки тепловиділяючого елемента (ТВЕЛ): цирконієвий сплав;

Відносний крок решітки розміщення ТВЕЛів:  $s/d_2=1,2$ ;

Товщина оболонки ТВЕЛ:  $\delta_{об}=0,9$  мм (див. рис. 1.1).

До другого блоку даних відносяться дані, що змінюються в залежності від варіанта. До них належать:

$Q_T$  - загальна теплова потужність реактора, МВт;

$q_{v0}$  - питома енерговиділення, МВт/м<sup>3</sup>;

$x$  - паровміст на виході із активної зони;

$\beta$  - співвідношення між висотою  $H$  та діаметром  $D_0$  активної зони;

$d_c$  - діаметр центральної трубки, м (див. рис. 1.1);

$d_2$  - зовнішній діаметр оболонки тепловиділяючого елемента, м (див. рис. 1.1).

Числові значення параметрів другого блоку задаються викладачем на початку семестру при видачі завдання на розрахункову роботу.

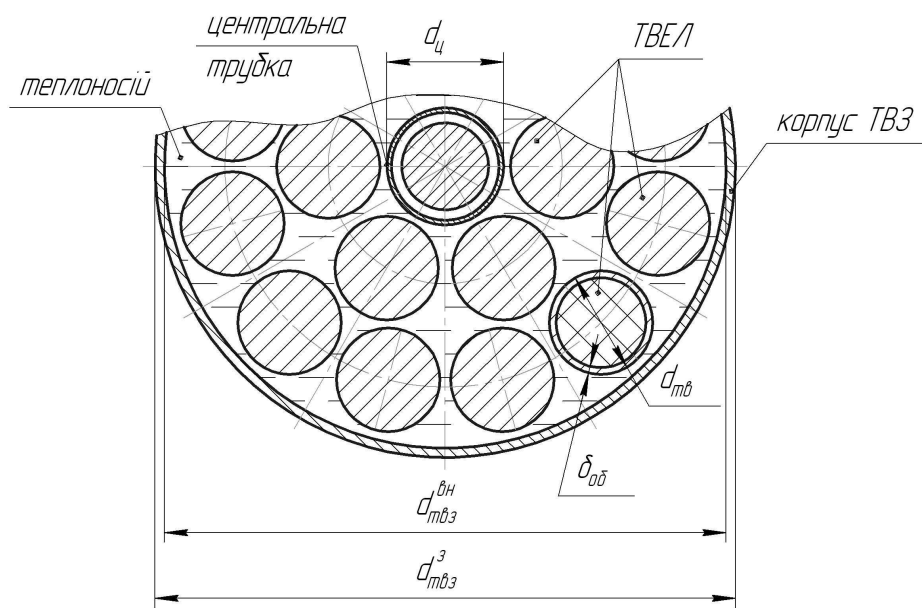


Рисунок 1.1 – Конструкція тепловідляючої збірки реактора РБМК-1000

## 2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ АКТИВНОЇ ЗОНИ

### Equation Section 2

Теплогідравлічний розрахунок активної зони розпочинається з визначення розмірів активної зони реактора.

Об'єм активної зони можна визначити за формулою:

$$V_{\text{аз}} = \frac{Q_{\text{т}}}{q_{\text{v0}}}, \quad (2.1)$$

де  $Q_{\text{т}}$  - тепловиділення в активній зоні, Вт;

$q_{\text{v0}}$  - об'ємне тепловиділення в активній зоні, Вт/м<sup>3</sup>.

Оскільки активна зона представляє собою циліндр діаметром  $D_0$  і висотою  $H_0$ , то її об'єм визначається як

$$V_{\text{аз}} = \frac{\pi D_0^2}{4} H_0. \quad (2.2)$$

З метою зменшення розсіювання нейтронів через бічні стінки активної зони відношення між її діаметром і висотою  $\beta$  має бути в межах 0.8-0.9.

$$H_0 = \beta \cdot D_0 \quad (2.3)$$

З врахуванням залежності (2.3) із (2.2) можна визначити діаметр активної зони:

$$D_0 = \sqrt[3]{\frac{4V_{\text{аз}}}{\pi\beta}} \quad (2.4)$$

Після визначення діаметра активної зони, із співвідношення (2.3) визначається висота активної зони.

ТВЗ разом із прилеглим до неї сповільнювачем утворює чарунку (комірку) активної зони. Кількість чарунок в активній зоні визначається співвідношенням:

$$N = \frac{\pi D_0^2}{4f_{\text{ч}}}, \quad (2.5)$$

де  $f_{\text{ч}}$  – площа однієї чарунки,  $\text{м}^2$ .

Приймаючи до уваги, що в реакторах типу РБМК ТВЗ розташовуються у квадратній решітці розміром  $a \times a$ , де  $a=0,25$  м [1]:

$$f_{\text{ч}} = a^2 \quad (2.6)$$

Для подальших розрахунків визначаємо прохідний переріз для проходу теплоносія та гідравлічний діаметр ТВЗ.

Прохідний переріз чарунки визначається за формулою:

$$S_{\text{ч}} = \frac{\pi}{4} \left( (d_{\text{ТВЗ}}^{\text{BH}})^2 - nd_2^2 - d_{\text{ц}}^2 \right) \quad (2.7)$$

Гідравлічний діаметр ТВЗ можна визначити як:

$$d_{\text{ТВЗ}}^{\text{Г}} = \frac{4S_{\text{ч}}}{\Pi_{\text{Г}}} \quad (2.8)$$

де  $\Pi_{\text{Г}}$  – змочений периметр ТВЗ, м:

$$\Pi_{\text{Г}} = \pi \left( d_{\text{ТВЗ}}^{\text{BH}} + nd_2 + d_{\text{ц}} \right) \quad (2.9)$$

Крім того визначається тепловий периметр ТВС:

$$d_{\text{ТВЗ}}^{\text{T}} = \frac{4S_{\text{q}}}{\Pi_{\text{T}}} \quad (2.10)$$

де  $\Pi_{\text{T}}$  – тепловий периметр ТВС, м:

$$\Pi_{\text{T}} = \pi d_2 n \quad (2.11)$$

В теплових розрахунках активної зони використовують висоту активної зони з врахуванням екстрапольованої добавки (див. рис. 2.1):

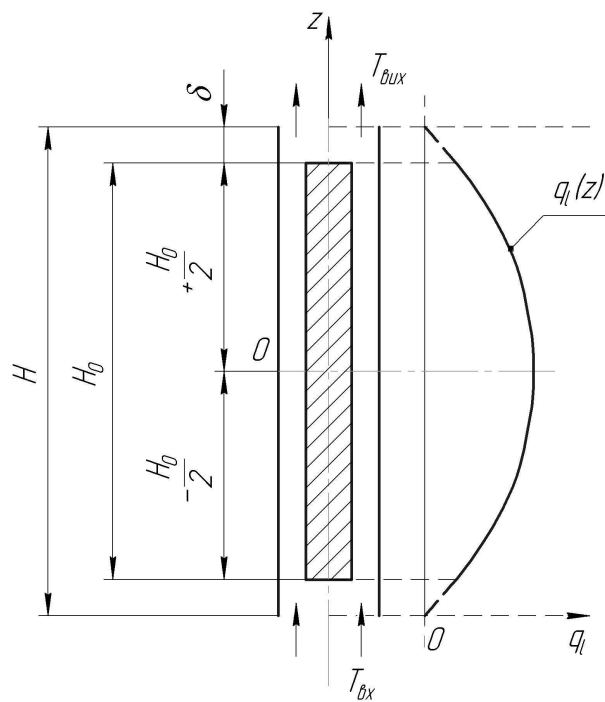


Рисунок 2.1 – Розподіл тепловиділення по висоті ТВЕЛа

$$H = H_0 + 2\delta \quad (2.12)$$

Для реакторів типу РБМК-1000 екстрапольована добавка до розмірів активної зони приймається рівною 0,6 м.

## 3 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ПАРМЕТРІВ ПО ВИСОТІ КАНАЛА З РОЗРАХУНКУ НА СЕРЕДНЄ ТЕПЛОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ

### Equation Section (Next)

#### 3.1 Розрахунок витрати і швидкості теплоносія в ТВЗ

Розрахунок витрати проводиться на основі рівняння теплового балансу. Враховуючи, що на виході із активної зони маємо паро-водяну суміш,

$$Q_T = G \left[ (i' + x \cdot r)_{\text{вих}} - i_{\text{вх}} \right] N \quad (3.1)$$

де  $G$  – витрата рідини, кг/с;

$i_{\text{вх}}$  – ентальпія теплоносія на вході в активну зону, визначається за заданими тиском  $P_{\text{вх}}$  і температурою  $t_{\text{вх}}$ , Дж/кг;

$i'$  – ентальпія рідини на лінії насичення, що визначається за тиском на виході  $P_{\text{вих}}$ , Дж/кг;

$r$  – теплота пароутворення для параметрів у вихідному перерізі, Дж/кг.

Тоді

$$G = \frac{Q_T}{\left[ (i' + x \cdot r)_{\text{вих}} - i_{\text{вх}} \right] N} \quad (3.2)$$

Оскільки по висоті активної зони відбувається зміна як температури, так і тиску, то при розрахунках доцільно використовувати масову швидкість:

$$\rho_w = \frac{G}{S_q} \quad (3.3)$$

### 3.2 Визначення густин теплових потоків

Розподіл лінійної густини теплового потоку по висоті каналу визначається за залежністю:

$$q_1(z) = q_{1,0} \cdot \cos\left(\frac{\pi z}{H}\right), \quad (3.4)$$

де  $z$  змінюється від  $-\frac{H_0}{2}$  до  $+\frac{H_0}{2}$ ;

$q_{1,0}$  – тепловий потік в центральному перерізі активної зони реактора, що для ТВЕЛа із розрахунку на середнє навантаження визначається як:

$$q_{1,0} = \frac{Q_r \cdot k_z}{H_0 \cdot n} \quad (3.5)$$

де  $n$  – кількість стрижневих твелів у ТВЗ.

$k_z$  – коефіцієнт нерівномірності енерговиділення по висоті активної зони, що визначається:

$$k_z = \frac{\pi H_0}{2H \cdot \sin\left(\frac{\pi H_0}{2H}\right)} \quad (3.6)$$

Розподіл густини поверхневого теплового потоку:

$$q_s(z) = 0.94 \frac{q_1(z)}{\pi d_2} \quad (3.7)$$

Розрахунок за (3.4) та (3.7) проводиться для п'яти характерних точок (значень координати  $z$ ):  $-\frac{H_0}{2}$ ;  $-\frac{H_0}{4}$ ;  $0$ ;  $+\frac{H_0}{4}$ ;  $+\frac{H_0}{2}$ . За знайденими за (3.4) значеннями  $q_1(z)$  будується графік розподілу даної величини по висоті активної зони реактора.

### 3.3 Визначення границі економайзерної ділянки

Оскільки реактори типу РБМК відносяться до реакторів, в яких має місце кипіння, необхідно визначити координату точки його початку. Цей процес проводиться методом послідовних ітерацій таким чином.

1. Довільно задається границя економайзерної ділянки  $z_{пк}$  тобто ділянки, на якій ще не відбувається кипіння в діапазоні від  $-\frac{H_0}{2}$  до  $+\frac{H_0}{2}$ .
2. Розраховується середнє значення лінійної густини теплового потоку по формулі:

$$\overline{q_{1,твс}} = \frac{n \cdot q_{1,0}}{z_{пк} + \frac{H_0}{2}} \cdot \frac{H}{\pi} \left[ \cos\left(\frac{\pi\delta}{H}\right) - \cos\left(\frac{\pi\left(z_{пк} + \frac{H_0}{2} + \delta\right)}{H}\right) \right] \quad (3.8)$$

3. Визначимо кількість теплоти, що підводиться до теплоносія на ділянці  $z_{пк}$ , через середнє теплове навантаження:

$$Q_1 = \overline{q_{1,твс}} \cdot z_{пк} \quad (3.9)$$

4. Визначимо кількість теплоти, що підводиться до теплоносія на ділянці  $z_{пк}$ , через рівняння теплового балансу:

$$Q_2 = G \cdot [i'(z_{\text{пк}}) - i_{\text{вх}}] \quad (3.10)$$

тут  $i'(z_{\text{пк}})$  - ентальпія рідини на лінії насичення при тиску на відстані  $z_{\text{пк}}$  від входу в активну зону.

Вважаючи зміну тиску по висоті лінійною від  $P_{\text{вх}}$  до  $P_{\text{вих}}$ , можемо визначити тиск на висоті  $z_{\text{пк}}$ :

$$P(z_{\text{пк}}) = P_{\text{вх}} - (P_{\text{вх}} - P_{\text{вих}}) \frac{z_{\text{пк}} + H_0/2}{H_0} \quad (3.11)$$

5. Проводимо порівняння отриманих величин кількостей теплоти  $Q_1$  та  $Q_2$ .

Якщо не виконується нерівність  $0.95 \leq \frac{Q_1}{Q_2} \leq 1.05$ , коректуємо значення

$z_{\text{пк}}$  по формулі

$$z_{\text{пк}}^{(i+1)} = z_{\text{пк}}^{(i)} \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (3.12)$$

і повертаємося до п. 1

### 3.4 Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі по висоті активної зони

Розрахунок проводиться для п'яти характерних точок:  $-\frac{H_0}{2}$ ;  $-\frac{H_0}{4}$ ; 0;  $+\frac{H_0}{4}$ ;  $+\frac{H_0}{2}$ , а також точки, в якій починається кипіння  $z_{\text{пк}}$ .

На ділянці із координатами  $z_i \leq z_{\text{пк}}$  розрахунок інтенсивності тепловіддачі проводиться по залежності:

$$\alpha_i = 0.021 \frac{\lambda_i}{d_r} \text{Re}_i^{0.8} \text{Pr}_i^{0.43}, \quad (3.13)$$

де  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності теплоносія, Вт/(м·К), який як і інші теплофізичні властивості визначається за тиском в даному перерізі  $P(z_i)$  (див. (3.11)) та за температурою теплоносія в даному перерізі  $t_r(z)$ ;

$\text{Pr}_i$  – число Прандтля;

$\text{Re}_i$  – місцеве значення числа Рейнольдса

$$\text{Re}_i = \frac{\rho w d_r}{\mu_i}, \quad (3.14)$$

$\rho w$  – масова швидкість теплоносія (див. (3.3)), кг/(м<sup>2</sup>·с);

$\mu_i$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Для визначення температури  $t_r(z)$  припустимо, що зміна температури на ділянці від входу в АЗ і до кінця економайзерної ділянки ( $z_{\text{пк}}$ ) є лінійною, тоді значення  $t_r(z)$  в будь-якій точці з координатою  $z$  можна розрахувати методом лінійної інтерполяції:

$$t_r(z) = t_{\text{вх}} + (t_s(z_{\text{пк}}) - t_{\text{вх}}) \frac{z + H_0/2}{z_{\text{пк}} + H_0/2}, \quad (3.15)$$

де  $t_{\text{вх}}$  – температура на входу в АЗ згідно вихідних даних, °С;

$t_s(z_{\text{пк}})$  – температура насичення на границі економайзерної ділянки, що визначається за тиском  $P(z_{\text{пк}})$ , °С.

На ділянці, де відбувається кипіння, коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою:

$$\alpha_i = \frac{10.45 \cdot 10^{-3}}{3.3 - 0.0113(t_s(z_i) - 100)} \cdot (q_s(z_i) \cdot n \cdot 10^3)^{0.7} \quad (3.16)$$

де  $t_s(z_i)$  – температура насичення у точці з координатою  $z_i$ , визначається за тиском у даному перерізі, °С;

$q_s(z_i)$  – густина поверхневого теплового потоку у відповідному перерізі (див. (3.7)).

За знайденими за (3.13) та (3.16) значеннями коефіцієнтів тепловіддачі будується графік розподілу цієї величини по висоті активної зони реактора.

### 3.5 Розрахунок температур оболонки ТВЕЛа

Після розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі, можна розрахувати температуру зовнішньої поверхні оболонки ТВЕЛа.

$$t_{об}^3(z) = t_r(z) + \frac{\chi \cdot q_l(z)}{\Pi_T \cdot \alpha(z)} \quad (3.17)$$

де  $t_r(z)$  – температура теплоносія у відповідному перерізі  $z$  (див. (3.15)), °С;

$\chi$  – коефіцієнт, що враховує тепловиділення у ТВЕЛі, і знаходиться в діапазоні значень від 0,92 до 0,94.

Температура внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛа визначається згідно залежності:

$$t_{об}^{BH}(z) = t_{об}^3(z) + 0.94 \cdot q_l(0) \cdot \sin\left(\frac{\pi \left[ z - \frac{H_0}{2} \right]}{H}\right) \cdot \frac{\delta_{об}}{2\pi d_{ТВЗ}^{BH} \lambda_{ст}(z)} \quad (3.18)$$

де  $\lambda_{ст}(z)$  - коефіцієнт теплопровідності матеріалу корпусу твела в даному перерізі  $z_i$  (див. табл. Б.1 в додатку Б). Внаслідок того, що товщина стінки незначна, коефіцієнт теплопровідності стінки можна брати по температурі зовнішньої стінки.

За знайденими за (3.17) та (3.18) значеннями температур зовнішньої та внутрішньої оболонок ТВЕЛа будується графік розподілу цих температур по висоті активної зони реактора. Причому значення  $t_{об}^3(z)t_{об}^{BH}(z)$  відкладаються на одному і тому ж графіку.

### 3.6 Розрахунок запасу до кризи тепловіддачі

Внаслідок того, що ректор типу РБМК відноситься до типу киплячих реакторів, необхідно підбирати такі умови теплообміну, щоб в жодному перерізі активної зони не відбувалося кризи тепловіддачі, яка може призвести до плавлення осердя та оболонок ТВЕЛів і, як наслідок, до руйнування активної зони реактора. Тому при проведенні повіркового розрахунку активної зони ядерного реактора необхідно перевіряти наявність запасу до кризи теплообміну в характерних перерізах. Для цього необхідно спочатку знайти величину критичної густини теплового потоку в характерних перерізах активної зони:

$$q_{кр}(z) = 0,65 \cdot 10^6 \cdot (\rho w)^{0,2} (1,3 - 4,36 \cdot 10^{-2} \cdot P(z)) (1 - x)^{1,2}, \quad (3.19)$$

де  $\rho w$  – масова швидкість теплоносія (див. (3.3)), кг/(м<sup>2</sup>·с);

$P(z)$  – тиск в перерізі з координатою  $z$  (див. (3.11)), МПа;

$x$  – паровміст на виході із активної зони.

Використовуючи знайдені за (3.19) значення критичної густини теплового потоку та знайдені за (3.7) значення густини поверхневого теплового потоку, знаходять запас до кризи теплообміну в характерних перерізах активної зони:

$$k(z) = \frac{q_{кр}(z)}{q_s(z)}. \quad (3.20)$$

Запас до кризи  $k(z)$  повинен бути не менше 1,3-1,35. При невиконанні даної умови існує висока імовірність виникнення кризи теплообміну в каналі активної зони ядерного реактора.

## 4 РОЗРАХУНОК ГІДРАВЛІЧНОГО ОПОРУ АКТИВНОЇ ЗОНИ

### Equation Section (Next)

Розрахунок гідравлічного опору каналів є важливою частиною теплогідравлічного розрахунку активної зони ядерного реактора, оскільки за значенням даного параметру визначається потужність головного циркуляційного насосу (ГЦН), необхідна для прокачування теплоносія через активну зону.

Як було зазначено вище, в каналі реактору типу РБМК можна виділити економайзерну ділянку (тобто ділянку, де кипіння відстуне) та ділянку кипіння. Загальний гідравлічний опір всього каналу буде сумою гідравлічних опорів кожної з цих ділянок. Опір кожної з ділянок можна визначити за виразом:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{м}} + \Delta P_{\text{нів}} + \Delta P_{\text{приск}}, \quad (4.1)$$

де  $\Delta P_{\text{тр}}$  – втрата тиску на тертя, Па;

$\Delta P_{\text{м}}$  – втрата тиску на місцевих опорах, Па;

$\Delta P_{\text{нів}}$  – нівелірна складова, Па;

$\Delta P_{\text{приск}}$  – втрата тиску на прискорення потоку теплоносія, Па.

Оскільки на економайзерній ділянці потік теплоносія однофазний (рідина), а на ділянці кипіння – пароводяна суміш, то значення та формули для розрахунку складових гідравлічного опору (4.1) будуть відрізнятись. Тому розрахунок гідравлічного опору слід проводити окремо для економайзерної ділянки та ділянки кипіння.

### 4.1 Розрахунок гідравлічного опору економайзерної ділянки

Втрати тиску на тертя на економайзерній ділянці визначаються за формулою Дарсі:

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\text{ек}} = \xi_{\text{п}} \frac{z_{\text{пк}} + \frac{H_0}{2} + \delta}{d_{\text{ТВЗ}}^{\Gamma}} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (4.2)$$

де  $\xi_{\text{п}}$  – коефіцієнт опору тертя пучка стрижневих ТВЕЛів;

$z_{\text{пк}}$  – координата початку ділянки кипіння (див. (3.12)), м;

$d_{\text{ТВЗ}}^{\Gamma}$  – гідравлічний діаметр ТВЗ (див. (2.8)), м;

$\rho$  – середня густина теплоносія на економайзерній ділянці,  $\text{кг/м}^3$ . Даний

параметр визначається як  $\rho = f(P_{\text{вх}}; \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{с}}^{\text{пк}}}{2})$ , де  $t_{\text{с}}^{\text{пк}}$  – температура насичення,

що відповідає тиску в точці з координатою  $z_{\text{пк}}$ , який можна визначити за (3.11);

$w$  – середня швидкість теплоносія на економайзерній ділянці, що визначається в результаті ділення масової швидкості  $\rho w$  (див. (3.3)) на середню густину теплоносія, м/с.

Оскільки ТВЕЛи в ТВЗ реактора РБМК розміщені в трикутній решітці, то  $\xi_{\text{п}}$  визначається зі співвідношення:

$$\xi_{\text{п}}/\xi_{\text{тр}} = 0,57 + 0,18(s/d_2 - 1) + 0,53[1 - \exp(-b)], \quad (4.3)$$

де  $\xi_{\text{тр}}$  – коефіцієнт опору тертя;

$s/d_2$  – відносний крок решітки розміщення ТВЕЛів;

$b$  – константа, що визначається як:

$$b = \begin{cases} 0,58\{1 - \exp[-70(s/d_2 - 1)]\} + 0,92(s/d_2 - 1) & \text{при } s/d_2 = 1,02; \\ 0,58 + 9,2(s/d_2 - 1) & \text{при } s/d_2 > 1,02. \end{cases} \quad (4.4)$$

Коефіцієнт опору тертя  $\xi_{\text{тр}}$  в формулі (4.3) залежить від значення числа Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{w d_r}{\nu}, \quad (4.5)$$

де  $\nu$  – середній коефіцієнт кінематичної в'язкості теплоносія на економайзерній ділянці, що визначається як  $\nu = f(P_{\text{вх}}; \frac{t_{\text{вх}} + t_{\text{с}}^{\text{ПК}}}{2})$ , м<sup>2</sup>/с.

Тоді:

$$\xi_{\text{тр}} = \begin{cases} 121/\text{Re} & \text{при } \text{Re} \leq 2300; \\ 0,316/\text{Re} & \text{при } \text{Re} = 3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^5; \\ 1/(1,82 \cdot \lg \text{Re} - 1,64)^2 & \text{при } \text{Re} > 3 \cdot 10^5. \end{cases} \quad (4.6)$$

Наступною складовою формули (4.1) є втрати тиску на місцевих опорах, які визначаються таким чином:

$$\Delta P_{\text{м}}^{\text{ек}} = \xi_{\text{м}} w^2 \rho / 2, \quad (4.7)$$

де  $\xi_{\text{м}}$  – коефіцієнт місцевого опору.

Основними місцевими опорами в активній зоні ядерного реактора є дистанціюючі решітки, що встановлюються по її висоті з кроком 20-30 діаметрів ТВЕЛів ( $d_2$ ). Коефіцієнт місцевого опору однієї дистанціюючої решітки можна прийняти постійним і рівним 0,5 [1]. Оскільки в даному випадку втрати тиску на місцевих опорах розраховуються лише для економайзерної ділянки, то кількість дистанціюючих решіток треба визначати не для всієї висоти активної зони, а лише для висоти економайзерної ділянки, яка дорівнює

$$z_{\text{пк}} + \frac{H_0}{2} + \delta.$$

Нівелірна складова втрат тиску визначається за виразом:

$$\Delta P_{\text{нів}}^{\text{ек}} = g\rho \left( z_{\text{пк}} + \frac{H_0}{2} + \delta \right), \quad (4.8)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ .

Останньою складовою виразу (4.1) є втрати тиску на прискорення потоку теплоносія. Однак для крапельних рідин при розрахунках цією величиною можна знехтувати.

Визначивши всі складові втрат тиску за (4.2), (4.7) та (4.8), слід підставити їх в формулу (4.1) та знайти повну втрату тиску на економайзерній ділянці активної зони  $\Delta P_{\text{ек}}$ .

#### 4.2 Розрахунок гідравлічного опору ділянки кипіння

Втрати тиску на тертя на ділянці кипіння розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{\text{тр}}^{\text{кип}} = \xi_{\text{п}} \frac{\frac{H_0}{2} + \delta - z_{\text{пк}}}{d_r} \frac{w_0^2 \rho'}{2} \psi \left[ 1 + x \left( \frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right], \quad (4.9)$$

де  $\xi_{\text{п}}$  – коефіцієнт гідравлічного опору в пучку стрижнів;

$w_0$  – швидкість циркуляції,  $\text{м/с}$ ;

$\rho'$ ,  $\rho''$  – густина води та водяної пари відповідно на лінії насичення, що визначається за тиском в точці з координатою  $z_{\text{пк}}$  (див. (3.11)),  $\text{кг/м}^3$ ;

$\psi$  – коефіцієнт;

$x$  – паровміст на виході із активної зони.

Коефіцієнт гідравлічного опору в пучку стрижнів визначається як:

$$\xi_{\text{п}} = \xi_{\text{тр}} \eta, \quad (4.10)$$

де  $\xi_{\text{тр}}$  – коефіцієнт гідравлічного опору для потоку в трубі;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує неподібність пучка стрижнів та труби.

Коефіцієнт гідравлічного опору для потоку в трубі можна визначити за виразом (4.6). При цьому число Рейнольдса слід розраховувати як:

$$\text{Re} = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d_r \cdot \mu'}, \quad (4.11)$$

де  $G$  – витрата теплоносія (див. (3.2)), кг/с;

$\mu'$  – коефіцієнт динамічної в'язкості води на лінії насичення, що визначається за тиском в точці з координатою  $z_{\text{пк}}$  (див. (3.11)), Па·с.

При визначенні  $\xi_{\text{гр}}$  слід враховувати, що для випадку  $\text{Re} \leq 2300$  чисельник дробу у формулі (4.6) приймає значення 64.

Коефіцієнт  $\eta$ , що входить до виразу (4.10), визначається як:

$$\eta = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2}, \quad (4.12)$$

де

$$\eta_1 = 0,6 + 0,6 \left( \frac{s}{d_2} - 1 \right)^{0,2}; \quad (4.13)$$

$$\eta_2 = \left[ \frac{2\varepsilon}{1-\varepsilon^2} \left( \frac{\varepsilon}{2} - \frac{3}{2} - \frac{\ln \varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \right]^{-0,25}, \quad (4.14)$$

тут  $\varepsilon = S_c / (S_q + S_c)$  – доля площі каналу, зайнята ТВЕЛами;

$S_c$  – сумарна площа перетину ТВЕЛів, м<sup>2</sup>:

$$S_c = \frac{\pi}{4} n d_2^2; \quad (4.15)$$

$S_{\text{ч}}$  – площа прохідного перерізу чарунки (див. (2.7)),  $\text{м}^2$ .

Для ТВЗ з відносним кроком  $s/d_2 > 1,2$   $\eta$  можна розраховувати за простішою формулою:

$$\eta = 0,92 + 0,17/\sqrt{\varepsilon}. \quad (4.16)$$

Швидкість циркуляції, що входить до виразу (4.9), розраховується за формулою:

$$w_0 = \frac{\rho w}{\rho'}. \quad (4.17)$$

Коефіцієнт  $\psi$  з формули (4.9) розраховується за виразом:

$$\psi = \left[ 1 + 0,57 \left( \frac{1}{0,2 + k} - 5,2x^2 \right) x^{0,125} (1-x)^2 \right] \left[ 1 + x \left( \frac{\mu'}{\mu''} - 1 \right) \right]^{-0,2x}, \quad (4.18)$$

де

$$k = \frac{w_0}{\sqrt{gd_r}} \cdot \frac{\rho''}{\rho'}; \quad (4.19)$$

$\mu''$  – коефіцієнт динамічної в'язкості пари на лінії насичення, що визначається за тиском в точці з координатою  $z_{\text{пк}}$  (див. (3.11)),  $\text{Па}\cdot\text{с}$ .

Втрати тиску на місцевих опорах на ділянці кипіння визначаються за виразом:

$$\Delta P_{\text{м}}^{\text{кип}} = \sum \xi_{\text{м}}^{\text{кип}} \cdot \frac{(\rho w)^2}{2\rho'} \left[ \frac{\rho'}{\rho''} \cdot \frac{x^2}{\varphi} + \frac{(1-x)^2}{1-\varphi} \right], \quad (4.20)$$

де  $\Sigma \xi_{\text{м}}^{\text{кип}}$  – сумарний коефіцієнт опору всіх дистанціюючих решіток для потоку двофазного теплоносія на ділянці кипіння;

$\varphi$  – істинний об'ємний паровміст.

Сумарний коефіцієнт опору всіх дистанціюючих решіток представляє собою коефіцієнт опору однієї решітки, помножений на кількість решіток на ділянці кипіння. Коефіцієнт опору однієї решітки в потоці двофазного теплоносія можна розрахувати як:

$$\xi_{\text{м}}^{\text{кип}} = \xi_{\text{др}} + 3400m^{-1.5} \text{Re}^{-1}, \quad (4.21)$$

де  $\xi_{\text{др}}$  – коефіцієнт місцевого опору дистанціюючої решітки, який можна прийняти рівним 0,5;

$m$  – відношення площі прохідного перерізу дистанціюючої решітки до площі прохідного перерізу чарунки, яке можна прийняти рівним 0,15-0,25;

$\text{Re}$  – число Рейнольдса, що визначається як:

$$\text{Re} = \frac{\rho w d_p}{\rho' \nu'}, \quad (4.22)$$

тут  $d_p$  – гідравлічний діаметр дистанціюючої решітки, м;

$\nu'$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості води на лінії насичення, що визначається за тиском в точці з координатою  $z_{\text{пк}}$  (див. (3.11)),  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Гідравлічний діаметр дистанціюючої решітки визначається як:

$$d_p = \frac{4S_p}{\Pi_r}, \quad (4.23)$$

де  $S_p$  – площа прохідного перерізу дистанціюючої решітки, яку можна визначити, помноживши коефіцієнт  $m$  на площу прохідного перерізу чарунки (див. (2.7)),  $\text{м}^2$ ;

$\Pi_r$  – змочений периметр (див. (2.9)), м.

Знайшовши коефіцієнт опору однієї решітки за (4.21), слід знайти загальний коефіцієнт опору всіх решіток на ділянці кипіння, помноживши його на кількість решіток. Кількість решіток розраховується на довжину ділянки кипіння, яка складає  $\frac{H_0}{2} + \delta - z_{\text{ПК}}$ . При цьому крок встановлення решіток такий самий, як і в економайзерній зоні.

Істинний об'ємний паровміст для виразу (4.20) розраховується за виразом:

$$\varphi = \frac{w_0''}{w_{\text{см}} + \Delta w}, \quad (4.24)$$

де  $w_0''$  – приведена швидкість руху пари, м/с;

$w_{\text{см}}$  – швидкість руху пароводяної суміші, м/с;

$\Delta w$  – поправка, м/с.

Швидкість руху пароводяної суміші розраховується як:

$$w_{\text{см}} = \rho w \left( \frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'} \right). \quad (4.25)$$

Приведену швидкість руху пари можна розрахувати за формулою:

$$w_0'' = \frac{\rho' (w_0 - w_{\text{см}})}{\rho'' - \rho'}. \quad (4.26)$$

Поправка  $\Delta w$  у виразі (4.24) розраховується таким чином:

$$\Delta w = u_0 \psi (1 + 20 We^{0.75}), \quad (4.27)$$

де  $We$  – число Вебера:

$$We = \frac{w_{cm} \mu'}{\sigma}, \quad (4.28)$$

тут  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу рідини на лінії насичення, що визначається за тиском в точці з координатою  $z_{пк}$  (див. (3.11)), Н/м.

Коефіцієнт  $\psi$  у виразі (4.27) визначається як:

$$\psi = 1,4(\rho'/\rho'')^{0,2} (1 - \rho''/\rho')^5. \quad (4.29)$$

Коефіцієнт  $u_0$  у виразі (4.27) розраховується так:

$$u_0 = \begin{cases} 1,53 \left[ g\sigma(\rho' - \rho'') / (\rho')^2 \right]^{0,25} & \text{при } We > 344; \\ 0,35 \left[ g\sigma(\rho' - \rho'') / \rho' \right]^{0,5} & \text{при } We < 344 \end{cases}. \quad (4.30)$$

Після знаходження загального коефіцієнту опору  $\Sigma \xi_{cm}^{кип}$  та істинного об'ємного паровмісту їх значення слід підставити в (4.20) для розрахунку втрат тиску на місцевих опорах.

Нівелірну складову втрат тиску для ділянки кипіння можна розрахувати за формулою (4.8), в яку замість густини теплоносія  $\rho$  слід підставляти густину пароводяної суміші  $\rho_{cm}$ , а замість довжини економайзерної ділянки (останній множник у формулі (4.8)) – довжину ділянки кипіння, яка дорівнює  $\frac{H_0}{2} + \delta - z_{пк}$ .

Густину пароводяної суміші можна знайти як:

$$\rho_{cm} = (\rho'' w_0'' + \rho' w_0') / w_{cm}, \quad (4.31)$$

де  $w_0'$  – приведена швидкість руху рідини, м/с. Її можна знайти як:

$$w_0' = w_{cm} - w_0''. \quad (4.32)$$

Втрати тиску на прискорення на ділянці кипіння визначаються за виразом:

$$\Delta P_{\text{приск}}^{\text{кип}} = \frac{w_0^2 \rho' \cdot 2\varphi(1 - \rho''/\rho')}{2 \cdot 1 - \varphi(1 - \rho''/\rho')} \quad (4.33)$$

Після знаходження всіх складових втрат тиску за формулами (4.9), (4.20), (4.8) (з урахуванням (4.31)) та (4.33) їх значення слід підставити у (4.1) та знайти сумарні втрати тиску на ділянці кипіння  $\Delta P_{\text{кип}}$ .

В кінці розрахунку слід знайти загальні втрати тиску по довжині каналу активної зони. Вони дорівнюють сумі втрат на економайзерній ділянці та ділянці кипіння:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ек}} + \Delta P_{\text{кип}} \quad (4.34)$$

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы [Текст] / Дементьев Б.А. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
2. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 420 с.
3. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) [Текст] / П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 296 с.
4. Кутепов А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании [Текст] / А.М. Кутепов, Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. – М.: Высшая школа, 1986. – 447 с.

## ДОДАТОК А

Приклад оформлення титульного листа розрахункової роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Теплоенергетичний факультет  
Кафедра атомних електричних станцій і інженерної теплофізики

Розрахункова робота  
з курсу «Теплогідравлічні процеси в енергетичних установках»  
на тему: «Теплогідравлічний розрахунок активної зони ядерного реактора типу  
РБМК-1000»

Варіант №3

Виконав:  
Студент групи ТФ-11  
Іванов І.І.  
Прийняв:  
К.т.н. Петров П.І.

Київ - 2016

## ДОДАТОК Б

Теплофізичні властивості матеріалу корпусу тепловиділяючого елемента

Таблиця Б.1 – Коефіцієнт теплопровідності цирконієвого сплаву [1]

| T, К | $\lambda$ , Вт/(м·К) |
|------|----------------------|
| 293  | 21,4                 |
| 373  | 21,2                 |
| 473  | 20,9                 |
| 573  | 20,6                 |
| 673  | 20,4                 |
| 773  | 20,2                 |
| 873  | 20,1                 |
| 973  | 19,9                 |

## ЗМІСТ

|   |    |
|---|----|
| Вступ   | 3  |
| Мета виконання розрахункової роботи   | 3  |
| Рейтингова система оцінювання виконання розрахункової роботи                    | 3  |
| Структура розрахункової роботи  | 5  |
| Вимоги до оформлення розрахункової роботи                                       | 5  |
| 1 Вихідні дані до розрахунку  | 7  |
| 2 Розрахунок основних геометричних параметрів активної зони                     | 9  |
| 3 Визначення теплогідрравлічних параметрів по висоті каналу                     |    |
| з розрахунку на середнє теплове навантаження                                    | 12 |
| 3.1 Розрахунок витрати і швидкості теплоносія в ТВЗ                             | 12 |
| 3.2 Визначення густин теплових потоків  | 13 |
| 3.3 Визначення границі економайзерної ділянки                                   | 14 |
| 3.4 Розрахунок коефіцієнтів тепловіддачі по висоті активної зони                | 15 |
| 3.5 Розрахунок температур оболонки ТВЕЛа  | 17 |
| 3.6 Розрахунок запасу до кризи тепловіддачі                                     | 18 |
| 4 Розрахунок гідравлічного опору активної зони                                  | 19 |
| 4.1 Розрахунок гідравлічного опору економайзерної ділянки                       | 19 |
| 4.2 Розрахунок гідравлічного опору ділянки кипіння                              | 22 |
| Рекомендована література  | 29 |
| Додаток А. Приклад оформлення титульного листа розрахункової роботи             | 30 |
| Додаток Б. Теплофізичні властивості матеріалу корпусу тепловиділяючого елемента | 31 |