

*О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна,*

621,039.5

РЗ1

*В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша*

**РЕАКТОРИ І ПАРОГЕНЕРАТОРИ  
ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС:  
СХЕМИ, ПРОЦЕСИ, МАТЕРІАЛИ,  
КОНСТРУКЦІЇ, МОДЕЛІ**

*За редакцією проф. О. В. Єфімова*



О. В. Єфімов, М. М. Шилипенко,  
Т. В. Потапівна, В. Л. Казершев, Т. А. Гаркуша

РЕАКТОРИ І ПАРОГЕНЕРАТОРИ  
ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС:  
СХЕМИ, ПРОЦЕСИ, МАТЕРІАЛИ,  
КОНСТРУКЦІЇ, МОДЕЛІ

*Монографія*

*За редакцією проф. О. В. Єфімова*



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«Харківський політехнічний інститут»

**РЕАКТОРИ І ПАРОГЕНЕРАТОРИ  
ЕНЕРГОБЛОКІВ АЕС:  
СХЕМИ, ПРОЦЕСИ, МАТЕРІАЛИ,  
КОНСТРУКЦІЇ, МОДЕЛІ**

Монографія

*За редакцією проф. О. В. Єфімова*

Харків

2017

УДК 621.039.5

ББК 31.46

P31

А в т о р с ь к и й к о л е к т и в :

*О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко, Т. В. Потаніна,  
В. Л. Каверцев, Т. А. Гаркуша*

Р е ц е н з е н т и :

*Є. М. Письменний*, д-р техн. наук, проф., декан теплоенергетичного факультету  
Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»;

*Й. С. Мисак*, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри теплотехніки, теплових  
і атомних електричних станцій Національного університету «Львівська політехніка»;

*С. В. Литовченко*, д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри матеріалів  
реакторобудування та фізичних технологій Харківського національного  
університету ім. В.Н. Каразіна

Друкується за рішенням Вченої ради Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут» (протокол № 10 від 23.12.2016 р.)

Реактори і парогенератори енергоблоків АЕС: схеми, процеси,  
P31 матеріали, конструкції, моделі / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко,  
Т. В. Потаніна та ін.: за ред. О. В. Єфімова. - Харків : ТОВ «В справі».  
2017.-420 с.

ISBN 978-617-7305-28-5

У монографії наведено схеми, процеси, матеріали, конструкції, моделі реакторів і парогенераторів енергоблоків АЕС. Їх систем та устаткування. Монографія призначена для наукових співробітників та інженерів, що працюють у ядерній галузі енергетики, а також для викладачів, аспірантів і магістрів різних технічних спеціальностей, пов'язаних з цією галуззю знань.

Лл. 83. Табл. 59. Бібліогр.: 270 назв.

УДК 621.039.5

ББК 31.46

ISBN 978-617-7305-28-5

© Авторський колектив. 2017

# ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	8
----------------	---

## ГЛАВА 1

### Класифікація ядерних реакторів і теплові схеми АЕС

з реакторами різних типів .....	12
1.1. Загальний опис процесів і конструкцій ядерних реакторів АЕС.....	12
1.2. Класифікація ядерних реакторів АЕС .....	18
1.2.1. Класифікація реакторів за енергією нейтронів, що викликають поділ ядер .....	18
1.2.2. Класифікація реакторів за видом сповільнювача .....	20
1.2.3. Класифікація реакторів за видом і параметрами теплоносія .....	22
1.2.4. Класифікація реакторів за конструктивним виконанням.....	23
1.2.5. Класифікація реакторів за схемами компоновки устаткування.....	23
1.2.6. Класифікація реакторів за призначенням .....	24
1.3. Принципові теплові схеми виробництва пари на АЕС .....	24
1.4. Теплові схеми АЕС з реакторами різних типів.....	29
1.4.1. Схеми АЕС з реакторами, що охолоджуються рідким металом.....	29
1.4.2. Схеми АЕС з канальними реакторами.....	32
1.4.3. Схеми атомних станцій теплопостачання.....	34
1.4.4. Схеми АЕС і енерготехнологічних установок з високотемпературними газоохолоджуваними реакторами .....	34
1.4.5. Схеми АЕС з водо-водяними реакторами .....	35

## ГЛАВА 2

### Теплоносії ядерних енергетичних установок .....

2.1. Водні теплоносії.....	39
2.2. Рідкометалеві теплоносії .....	46
2.3. Рідкі органічні теплоносії.....	54
2.4. Газові теплоносії .....	55

## ГЛАВА 3

### Конструкційні матеріали активних зон ядерних реакторів АЕС.....

3.1. Конструкційні матеріали активних зон сучасних ядерних реакторів АЕС на теплових нейтронах.....	62
3.1.1. Роль конструкційних матеріалів активних зон ядерних реакторів енергетичних установок АЕС .....	62
3.1.2. Умови роботи конструкційних матеріалів активних зон ядерних енергетичних реакторів на теплових нейтронах .....	64
3.1.3. Шляхи підвищення ефективності ядерного палива за допомогою удосконалення конструкційних матеріалів активних зон реакторів .....	68

3.2. Конструкційні матеріали активних зон ядерних реакторів АЕС нового покоління .....	70
3.2.1. Умови роботи конструкційних матеріалів перспективних ядерних установок.....	72
3.2.2. Вимоги до матеріалів реакторів нового покоління .....	75
3.3. Конструкційні матеріали з цирконію для ядерної енергетики .....	77
3.3.1. Металургійні фактори, які визначають властивості сплавів цирконію, що знаходяться під дією опромінення .....	78
3.3.2. Технологічні схеми отримання цирконію і виробів з нього.....	82
3.3.3. Основні домішкові елементи в цирконієвих сплавах та їх вплив на властивості цих сплавів .....	84
3.3.4. Вплив гафнію на ефективність використання виробів з цирконію.....	87
3.3.5. Експериментальні дослідження рафінування цирконію.....	89
3.3.5.1. Рафінування цирконію методом електронно-променевої плавки.....	89
3.3.5.2. Очищення цирконію від кисню .....	94
3.3.5.3. Вплив чистоти цирконію на його структуру і властивості .....	95
3.3.6. Цирконієвий сплав для ядерних реакторів на основі української сировини .....	97
3.4. Гафній в ядерній енергетиці .....	103
3.4.1. Сучасні проблеми в галузі поглинаючих матеріалів для ядерних реакторів .....	103
3.4.2. Доцільність застосування гафнію в органах регулювання ядерних реакторів .....	107
3.4.3. Особливості виробництва гафнію в Україні .....	109
3.4.4. Отримання гафнію ядерної чистоти і дослідження його властивостей.....	113
3.5. Вплив зовнішніх чинників на зміну властивостей конструкційних матеріалів активних зон ядерних реакторів АЕС.....	118
3.5.1. Модифікація поверхні цирконію і сплаву Zr1 % Nb електронним пучком прискорювача .....	118
3.5.2. Радіаційно-плазмове модифікування приповерхневого шару цирконієвих матеріалів .....	124
3.5.3. Дослідження зміни властивостей конструкційних матеріалів на основі високочистого нікелю під дією зовнішніх факторів.....	126

#### **ГЛАВА 4**

<b>Конструктивні схеми, конструкції і технічні характеристики парогенераторів АЕС .....</b>	<b>130</b>
4.1. Загальні характеристики, типи і схеми парогенераторів АЕС і вимоги, що ставляться до них.....	130
4.2. Конструктивні схеми парогенераторів АЕС з водними теплоносіями.....	133
4.3. Конструктивні схеми парогенераторів АЕС з рідкометалевими теплоносіями .....	142
4.4. Конструктивні схеми парогенераторів АЕС з газовими теплоносіями.....	144

4.5. Конструктивні схеми парогенераторів АЕС з рідкими органічними теплоносіями.....	147
4.6. Класифікація конструкцій парогенераторів АЕС. їх елементів і поверхонь теплообміну.....	149
4.7. Конструкції і технічні характеристики парогенераторів АЕС з водними теплоносіями.....	150

## **ГЛАВА 5**

### **Конструкційні матеріали основного і допоміжного устаткування**

<b>парогенераторних установок АЕС</b> .....	161
5.1. Особливості конструкцій парогенераторів АЕС .....	161
5.2. Обґрунтування вибору матеріалів для парогенераторів, допоміжних систем і трубопроводів АЕС .....	163
5.3. Застосування перлітних сталей в якості конструкційних матеріалів для парогенераторних установок АЕС .....	169
5.4. Застосування нержавіючих сталей в якості конструкційних матеріалів для парогенераторних установок АЕС .....	173
5.5. Застосування високонікелевих сплавів в якості конструкційних матеріалів для парогенераторних установок АЕС .....	175

## **ГЛАВА 6**

### **Теплообмінні процеси і гідродинамічні характеристики**

<b>потоків у реакторах і парогенераторах АЕС</b> .....	179
6.1. Загальний опис гідродинамічних характеристик потоків і особливостей процесів теплообміну у парогенераторах АЕС.....	179
6.2. Основні математичні співвідношення моделей процесів теплообміну між теплоносієм і робочою речовиною у парогенераторах АЕС.....	182
6.3. Основні математичні співвідношення моделей однофазних потоків в каналах реакторів і парогенераторів АЕС для розрахунку їх гідродинамічних характеристик.....	187
6.4. Основні математичні співвідношення моделей двофазних потоків в каналах реакторів і парогенераторів АЕС для розрахунку їх гідродинамічних характеристик.....	194
6.5. Особливості режимів руху і основні математичні співвідношення моделей двофазних потоків у парогенеруючих каналах реакторів і парогенераторів АЕС для розрахунку їх гідравлічних опорів руху.....	199
6.6. Основні математичні співвідношення моделей двофазних потоків пароводяної суміші в пристроях парогенераторів АЕС для розрахунку їх гідродинамічних характеристик безнапірного руху.....	204

## **ГЛАВА 7**

### **Методики теплових і гідравлічних розрахунків парогенераторів АЕС**

<b>різних типів</b> .....	210
7.1. Види розрахунків, завдання і етапи проектування парогенераторів АЕС .....	210
7.2. Основні положення теплового розрахунку парогенераторів АЕС.....	212

7.3. Основні положення конструктивного розрахунку парогенераторів АЕС .....	218
7.4. Основні положення гідравлічного розрахунку парогенераторів АЕС .....	221
7.5. Методики теплового і гідравлічного розрахунків парогенераторів АЕС, що обігриваються водою під тиском .....	222
7.6. Методики теплового і гідравлічного розрахунків парогенераторів АЕС, що обігриваються рідким металом .....	232
7.7. Методики теплового і гідравлічного розрахунків парогенераторів АЕС з багаторазовою примусовою циркуляцією у випарнику .....	240
7.8. Загальні положення і підходи до математичного моделювання теплових і гідравлічних процесів у парогенераторах АЕС і методики створення комп'ютерних програм їх розрахунків.....	246

## **ГЛАВА 8**

### **Методики розрахунків вузлів і елементів конструкцій**

<b>парогенераторів АЕС на міцність і надійність</b> .....	255
8.1. Загальні положення розрахунків на міцність вузлів і елементів конструкцій парогенераторів АЕС .....	256
8.2. Методика розрахунку на міцність елементів парогенераторів АЕС у вигляді циліндричних посудин .....	260
8.3. Методика розрахунку на міцність кришок і днищ вузлів і елементів парогенераторів АЕС .....	266
8.4. Методика розрахунку на міцність болтових фланцевих з'єднань вузлів і елементів парогенераторів АЕС .....	271
8.5. Методика перевірного розрахунку на стійкість конструкцій елементів парогенераторів АЕС у вигляді оболонок .....	279
8.6. Різні види розрахунків надійності вузлів і елементів парогенераторів АЕС.....	284

## **ГЛАВА 9**

### **Методи і підходи до моделювання, діагностики, прогнозування стану**

<b>устаткування та оптимізації режимів роботи енергоблоків АЕС</b> .....	287
9.1. Основні методичні положення розрахунків і оптимізації параметрів і характеристик устаткування енергоблоків АЕС методами математичного моделювання .....	287
9.2. Оцінка ефективності теплових схем енергоблоків АЕС за параметрами стану і надійності устаткування .....	291
9.3. Ідентифікація математичних моделей устаткування енергоблоків АЕС в процесі параметричної діагностики.....	297
9.4. Застосування методів інтервальної статистики для діагностики параметрів стану устаткування енергоблоків АЕС .....	301
9.5. Аналіз методів і моделей оптимального розподілу навантажень між енергоблоками електростанцій.....	311



<b>ГЛАВА 10</b>	
<b>Імітаційне моделювання енергоблоків двоконтурних АЕС</b> .....	327
10.1. Принципи створення імітаційної моделі енергоблоків двоконтурних АЕС .....	328
10.2. Автоматизований комплекс комп'ютерних програм для моделювання режимів роботи енергоблоків двоконтурних АЕС .....	337
<b>ГЛАВА 11</b>	
<b>Аналіз впливу змін параметрів технологічних процесів в парогенераторах енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 на ефективність їх роботи</b> .....	
11.1. Аналіз впливу змін параметрів технологічних процесів в горизонтальних парогенераторах типу ПГВ-1000 на їх паропродуктивність.....	350
11.1.1. Залежність відносної паропродуктивності парогенератора типу ПГВ-1000 від температури живильної води.....	351
11.1.2. Залежність відносної паропродуктивності парогенератора типу ПГВ-1000 від температури теплоносія на вході до парогенератора .....	354
11.1.3. Залежність відносної паропродуктивності парогенератора типу ПГВ-1000 від тиску робочої речовини .....	357
11.1.4. Залежність відносної паропродуктивності парогенератора типу ПГВ-1000 від тиску теплоносія .....	359
11.1.5. Багатофакторний експеримент на імітаційній моделі парогенератора типу ПГВ-1000 .....	362
11.2. Інтегральні експлуатаційні характеристики енергоблоків АЕС з ВВЕР-1000 .....	372
<b>ГЛАВА 12</b>	
<b>Градiєнтні методи оптимізації для розв'язання задач розподілу навантажень між енергоблоками АЕС</b> .....	
12.1. Застосування оптимізаційного методу проекції градієнта для розв'язання задачі розподілу навантажень між енергоблоками АЕС .....	379
12.2. Використання математичних моделей і оптимізаційних процедур з метою підвищення середньої експлуатаційної теплової економічності енергоблоків АЕС.....	388
<b>Список літератури</b> .....	398