

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Узгоджено з НМВ №6049-РС-2026
07.09.2026 р.

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДЛЯ ВИКОНАННЯ РОЗРАХУНОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ
З ДИСЦИПЛІНИ «ВСТУП ДО ФАХУ»**

Для здобувачів 1 курсу бакалаврського рівня освіти спеціальности атомна енергетика очної та заочної форм навчання

Затверджено
на засіданні кафедри
атомних електричних станцій
протокол №1 від 28.08.2026 р.

Одеса 2026

Дубковський В. О. Методичні вказівки для виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Вступ до фаху» для здобувачів 1 курсу бакалаврського рівня освіти спеціальності атомна енергетика. Одеса: Національний університет «Одеська політехніка». - 2026. - 10 с.

Укладач:

В. О. Дубковський, доктор технічних наук, професор

Енергетика - галузь технічної та господарсько-економічної діяльності людини, спрямована на перетворення, розподіл та використання енергоресурсів. Ядерна енергетика поряд із тепловою та гідроенергетикою сьогодні є традиційною. Її головна і принципова відмінність полягає у використанні енергії ядерного палива, - збагаченого діоксиду урану UO_2 у формі циліндричних таблеток, що містяться в герметичні цирконієві трубки – твели (тепловиділяючі елементи). Для зручності використання твели об'єднуються в ТВЗ (тепловиділяючі збірки).

Пристрій, в якому здійснюється керована ланцюгова ядерна реакція, що супроводжується виділенням теплової енергії, називається ядерним реактором. Водо-водяні енергетичні реактори (ВВЕР), які працюють і на Українських АЕС, є основою світової ядерної енергетики.

Активна зона реактора ВВЕР-1000 складається із набору шестигранних касет (ТВЗ), виконаних із сплаву цирконію з ніобієм. Усередині ТВЗ розташовані ТВЕЛ, що омиваються водою. Між паливом та оболонкою існує газовий зазор. Касети також встановлюються з так званим міжкasetним проміжком, в якому знаходиться вода. Сукупність касет в активній зоні називається технологічними ґратами, а відстань між центрами касет — кроком технологічних ґрат (рис. 1). У касеті твели розташовуються в шаховому порядку, утворюючи ґрати твел (рис.2). Відстань між центрами твел називається кроком решітки твел. Відношення кроку решітки твел до зовнішнього діаметра оболонки твел називають відносним кроком решітки твел. У центрі касети знаходиться трубка зі сплаву цирконію, до якої кріпляться дистанціонуючі пристрої твелів.

Мета роботи

1. Ознайомлення здобувачів 1 курсу із конструкцією ядерної енергетичної установки (ЯЕУ).
2. Вироблення навичок проведення основних інженерних розрахунків під час проектування елементів ядерного реактора.
3. Закріплення отриманих знань на практичних заняттях та у процесі вивчення лекційного курсу «Вступ до фаху», а також у результаті захисту РГР.

Етапи виконання роботи

1. Розрахувати кількість всіх матеріалів, що знаходяться у ТВЗ реактора ВВЕР-1000, за умови, що матеріали регулюючих органів відсутні.
2. Визначити ядерні концентрації матеріалів та сполук у ТВЗ.
3. Здійснити розрахунок еквівалентного осередку Вігнера-Зейца.
4. Визначити макроскопічні перерізи поділу, розсіювання та поглинання нейтронів теплових енергій у ТВЗ.
5. По розрахованих геометричних характеристиках виконати креслення ТВЗ, елементів ґратки твел та осередку Вігнера-Зейца. Оскільки склад матеріалів за висотою активної зони практично не змінюється, то всі розрахунки проводяться на одиницю висоти активної зони, тобто для визначення кількості матеріалів ТВЗ достатньо знайти його сумарну площу в перерізі ТВЗ. Необхідно відзначити, що вода міжкasetного зазору також відноситься до тепловиділяючої збірки.

Внаслідок того, що реактор ВВЕР-1000 має дві регулярні гетерогенні грати — технологічні грати та грати твелів, — то для спрощення нейтронно-фізичного розрахунку зазвичай використовується метод, у якому реальне середовище замінюється еквівалентним їй гомогенним середовищем. Решітка ТВЗ активної зони представляється як набір осередків (комірок). Один із можливих форм такого осередку — тризонний осередок Вігнера-Зейца. У ній ТВС представлена як ядерного палива, оточеного шаром уповільнювача (теплоносія) (рис.3). Умови перетворення реальної ТВЗ на осередок Вігнера-Зейца наступні:

$$V_{\text{пал}}^{\text{ТВЗ}} = V_{\text{пал}}^{\text{В-З}}, \quad V_{\text{сп}}^{\text{ТВЗ}} = V_{\text{сп}}^{\text{В-З}}, \quad V_{\text{км}}^{\text{ТВЗ}} = V_{\text{км}}^{\text{В-З}},$$

де $V_{\text{пал}}^{\text{ТВЗ}}$; $V_{\text{сп}}^{\text{ТВЗ}}$; $V_{\text{км}}^{\text{ТВЗ}}$ - об'єм відповідно ядерного палива, сповільнювача та конструкційних матеріалів у ТВЗ;
 $V_{\text{пал}}^{\text{В-З}}$; $V_{\text{сп}}^{\text{В-З}}$; $V_{\text{км}}^{\text{В-З}}$ - об'єм г відповідно ядерного палива, сповільнювача та конструкційних матеріалів у осередку Вігнера-Зейца.

Вихідні дані до виконання завдання наводяться в табл. 1, 2 та 3 додатків цих методичних вказівок.

За останніми двома цифрами у номері залікової книжки студент вибирає чотири параметри з табл.2: крок технологічної решітки - h_1 ; відносний крок решітки твел - t і збагачення пального - x_5 , а також вид конструкційного матеріалу оболонки твела і касети.

Вихідні дані до виконання завдання наводяться в табл. 1, 2 та 3 додатків цих методичних вказівок.

Відповідно до свого варіанту здобувач вибирає чотири параметри з табл. 2: крок технологічної решітки - h_1 ; відносний крок решітки твел - t і збагачення пального - x_5 , а також вид конструкційного матеріалу оболонки твела і касети.

Оформлення розрахунково-графічної роботи включає:

1. Вступ.
2. Розрахунок геометричних показників ТВЗ.
3. Розрахунок кількості та складу матеріалів та сполук, що входять до ТВЗ.
4. Розрахунок ядерних концентрацій матеріалів, елементів та нуклідів, що входять до ТВЗ.
5. Розрахунок макроскопічних перерізів.
6. Графічну частину.
7. Висновки по роботі.

Критерії якості виконання роботи включають оцінку розрахункової частини, якість виконання графічної частини та оформлення роботи.

1. РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЗ

Завдання геометричного розрахунку - за своїми вихідними даними визначити кількість твелів у касеті та розміри касети.

1.1. Розмір касети під ключ:

$$h = h_1 - \delta.$$

1.2 Крок ґратки твел:

$$S = t \cdot d_n.$$

Величина кроку ґратки округляється з точністю до 0,1 мм.

1.3. Площа касети (з урахуванням стінки):

$$F_{\text{кас}} = (\sqrt{3}/2) \cdot h^2.$$

1.4. Площа всередині касети:

$$F_{\text{кас}^{\text{вн}}} = (\sqrt{3}/2) \cdot (h - 2 \cdot \delta_1)^2.$$

1.5. Площа всередині касети, зайнята твелями.

Між оболонкою касети і крайнім рядом твел існує зазор, рівний кроку ґратки твел - S (рис. 1). Тому площа всередині касети, зайнята твелями, визначається так:

$$F_{\text{ТВ}^{\text{кас}}} = (\sqrt{3}/2) \cdot (h - 2 \cdot \delta_1 - 2 \cdot S - d_n)^2.$$

1.6. Площа касет, що припадає на 1 твел.

На один твел приходить площа, обмежена ромбом, вершини якого — центри твелів (рис. 2):

$$f_{\text{ТВ}} = (\sqrt{3}/2) \cdot S^2.$$

1.7. Кількість твелів в касеті:

$$n_{\text{ТВ}} = (F_{\text{ТВ}^{\text{кас}}}/f_{\text{ТВ}}) - 1.$$

Зменшенням величини $n_{\text{ТВ}}$ на одиницю враховує те, що в центрі касети замість твела знаходиться центральна труба. Отримана величина $n_{\text{ТВ}}$ округляється до цілого значення.

2. РОЗРАХУНОК СКЛАДУ І КІЛЬКОСТІ МАТЕРІАЛІВ, ЩО ВХОДИТЬ В ТВЗ

2.1. Об'єм ядерного палива в касеті:

$$V_{\text{топл}} = (\pi/4) \cdot d^2 \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot H.$$

2.2. Об'єм теплоносія всередині касети:

$$V_{\text{H}_2\text{O}^{\text{кас}}} = [F_{\text{кас}^{\text{вн}}} - (\pi/4) \cdot d_n^2 \cdot n_{\text{ТВ}} - (\pi/4) \cdot (d_{\text{нар}^{\text{цт}}})^2] \cdot H.$$

2.3. Об'єм теплоносія в межкасетному зазорі:

$$V_{\text{H}_2\text{O}^{\text{МК}}} = (\sqrt{3}/2) \cdot (h_1^2 - h^2) \cdot H.$$

2.4. Об'єм оболонки твела:

$$V_{\text{ТВ}^{\text{об}}} = \pi \cdot d_n \cdot \delta_{\text{об}} \cdot n_{\text{ТВ}} \cdot H.$$

2.5. Об'єм центральної труби:

$$V_{\text{цт}} = (\pi/4) \cdot [(d_{\text{нар}^{\text{цт}}})^2 - (d_{\text{вн}^{\text{цт}}})^2] \cdot H.$$

2.6. Об'єм оболонки касети:

$$V_{\text{кас}^{\text{об}}} = (F_{\text{кас}} - F_{\text{кас}^{\text{вн}}}) \cdot H.$$

2.7. Загальний об'єм теплоносія:

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}^{\text{МК}}} + V_{\text{H}_2\text{O}^{\text{кас}}}.$$

2.8. Загальний об'єм конструкційних матеріалів:

$$V_{\text{км}} = V_{\text{ТВ}^{\text{об}}} + V_{\text{цт}} + V_{\text{кас}^{\text{об}}}.$$

2.9. Кількість палива в касете:

$$G_{\text{топл}} = V_{\text{топл}} \cdot \rho_{\text{UO}_2}.$$

2.10. Кількість теплоносія в касете та міжкasetному зазорі:

$$G_{\text{тн}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_{\text{H}_2\text{O}}.$$

2.11. Кількість конструкційних матеріалів касети:

$$G_{\text{км}} = V_{\text{км}} \cdot \rho_{\text{км}}.$$

2.12. Розрахунок еквівалентного осередку Вігнера-Зейца (рис. 3).

2.12.1. Еквівалентний діаметр палива:

$$d_0 = d \cdot \sqrt{n_{\text{ТВ}}}.$$

2.12.2. Еквівалентний діаметр конструкційних матеріалів в осередку:

$$d_2 = \sqrt{[4V_{\text{км}}/(H \cdot \pi) + d_0^2]}.$$

2.12.3. Еквівалентний діаметр теплоносія:

$$d_1 = \sqrt{[4V_{\text{H}_2\text{O}}/(H \cdot \pi) + d_2^2]}.$$

3. РОЗРАХУНОК ЯДЕРНИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ МАТЕРІАЛІВ І СПОЛУК, ЩО ВХОДИТЬ В ТВЗ

3.1. Ядерна концентрація палива:

$$N_{\text{топл}} = (\rho_{\text{UO}_2} \cdot N_{\text{ав}}) / (M_{\text{UO}_2});$$

де $N_{\text{ав}} = 6.023 \cdot 10^{23}$ — число Авогадро.

ρ_{UO_2} — фізична щільність диоксиду урана;

M_{UO_2} — молекулярна маса диоксиду урана.

3.2. Ядерна концентрація ізоотопу, що ділиться :

$$N_5 = N_{\text{топл}} \cdot x_5/100.$$

3.3. Ядерна концентрація ізоотопу, що не ділиться :

$$N_8 = N_{\text{топл}} \cdot (1 - x_5/100).$$

3.4. Ядерна концентрація кисню в паливі:

$$N_0 = 2 \cdot N_{\text{топл}}.$$

3.5. Ядерна концентрація теплоносія:

$$N_{\text{тн}} = (\rho_{\text{H}_2\text{O}} \cdot N_{\text{ав}}) / M_{\text{H}_2\text{O}}.$$

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ — щільність води, вибирається по таблицях стану води та водяної пари за тиском та середньою температурою теплоносія в касеті .

3.6. Ядерна концентрація конструкційних матеріалів:

$$N_{\text{км}} = (\rho_{\text{км}} \cdot N_{\text{ав}}) / M_{\text{км}}.$$

4. РОЗРАХУНОК МАКРОСКОПІЧНИХ ПЕРЕРІЗІВ В ТВЗ

4.1. Ядерне паливо

Макропереріз ділення:

$$\Sigma_f = \sigma_f^5 \cdot N_5.$$

Макропереріз радіаційного захоплення:

$$\Sigma_c = \sum_{i=1}^3 \sigma_{ci} \cdot N_i.$$

Макропереріз поглинання:

$$\Sigma_a = \Sigma_f + \Sigma_c.$$

Макропереріз розсіювання:

$$\Sigma_s = \sum_{i=1}^3 \sigma_{si} \cdot N_i$$

4.2. Теплоносій

Макропереріз поглинання:

$$\Sigma_a = \sigma_{a \text{ H}_2\text{O}} \cdot N_{\text{TH}}.$$

Макропереріз розсіювання:

$$\Sigma_s = \sigma_{s \text{ H}_2\text{O}} \cdot N_{\text{TH}}.$$

4.3. Конструкційний матеріал:

Макропереріз поглинання:

$$\Sigma_a = \sigma_a^{\text{KM}} \cdot N_{\text{KM}}.$$

Макропереріз розсіювання:

$$\Sigma_s = \sigma_s^{\text{KM}} \cdot N_{\text{KM}}.$$

V. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА

У цій частині здобувачі виконують три креслення, як показано на рисунках 1, 2 та 3 у масштабі та відповідно до розрахунків геометричних характеристик ТВЗ.

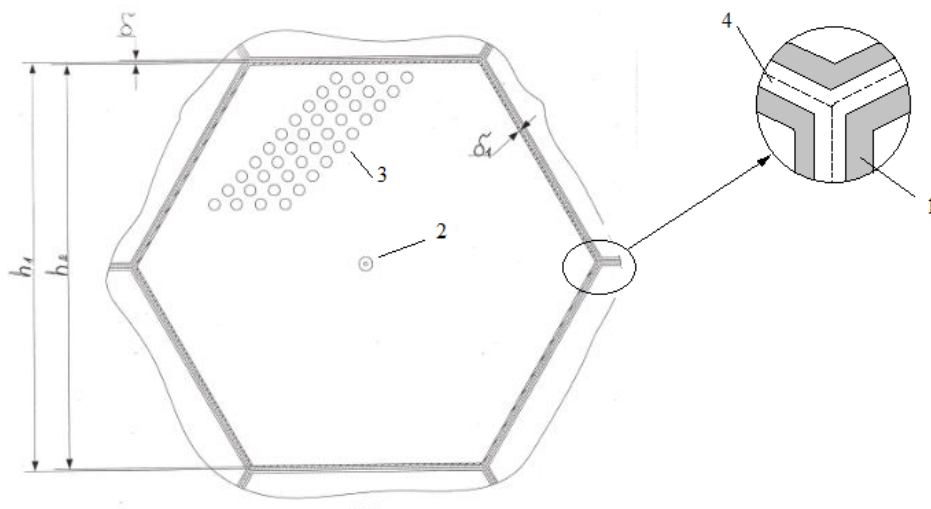


Рисунок 1 – Технологічні грати ТВЗ реактора ВВЕР-1000:

- 1 – корпус ТВЗ;
- 2 – центральна каркасна труба;
- 3 – твели;
- 4 - міжкasetний зазор.

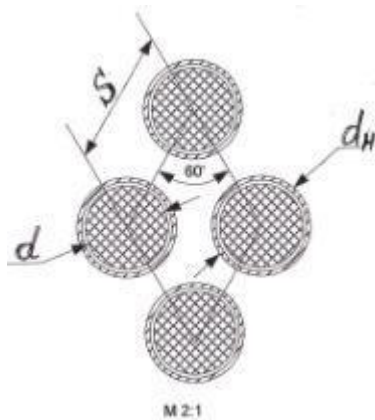


Рисунок 2 – Елемент гратки твел реактора ВВЕР-1000:

- 1 – оболонка твела;
- 2 – паливний сердечник;
- 3 – газовий зазор.

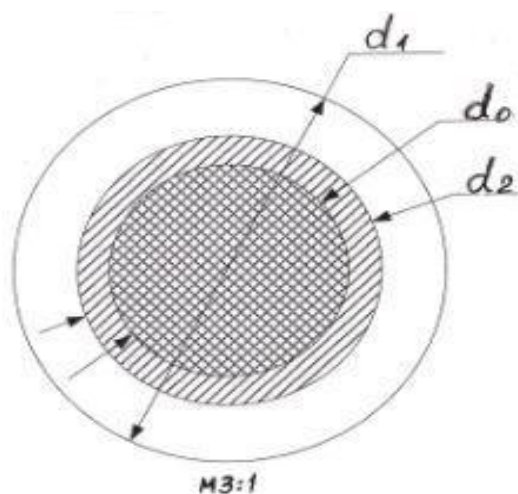


Рисунок 3 – Еквівалентний осередок Вігнера-Зейца.

Таблиця 1

Основні характеристики та параметри ТВЗ реактора ВВЕР-1000

Величина	Позначення	Розмірність	Значення
Теплоносіє — H_2O			
1. Температура на вході в ТВЗ	t_{TH}^{BX}	$^{\circ}C$	289
2. Температура на виході з ТВЗ	$t_{TH}^{BЫX}$	$^{\circ}C$	325
3. Тиск	P	МПа	16,0

Паливо — UO_2			
4. Діаметр паливного стрижня	d	мм	7,6
5. Товщина оболонки	$\rho_{об}$	мм	0,65
6. Товщина газового зазору	$\delta_{гз}$	мм	0,10
7. Зовнішній діаметр оболонки	d_n	мм	9,1
Паливна касета			
8. Міжкasetний зазор	δ	мм	2,0
9. Товщина стінки	δ_1	мм	1,5
10. Діаметр центральної труби:			
- внутрішній	$d_{вн}^{цт}$	мм	8
- зовнішній	$d_{нар}^{цт}$	мм	12
11. Довжина паливної частини касети	H	мм	3550

Таблиця 2

Вихідні дані до розрахунково-графічної роботи

Номер вар.	Крок технол. гратки, h_1 , мм	Відносний крок гратки твел, t	Збагачення палива, x_s , %	Конструкційний матеріал
1	2	3	4	5
01	240	1,45	4,2	нерж. сталь
02	250	1,45	4,2	цирконій
03	230	1,30	4,2	нерж. сталь
04	240	1,50	4,0	цирконій
05	235	1,35	4,4	нерж. сталь
06	245	1,40	4,6	цирконій
07	245	1,50	4,3	нерж. сталь
08	240	1,35	4,5	цирконій
09	230	1,35	4,4	нерж. сталь
10	250	1,50	4,4	цирконій
11	235	1,45	4,2	нерж. сталь
12	240	1,40	4,1	цирконій
13	245	1,35	4,2	нерж. сталь
14	250	1,40	4,3	цирконій
15	250	1,30	4,2	нерж. сталь
16	235	1,30	4,4	цирконій
17	245	1,55	4,3	нерж. сталь
18	235	1,55	4,5	цирконій
19	250	1,60	4,6	нерж. сталь
20	255	1,60	4,6	цирконій
21	260	1,60	4,4	нерж. сталь
22	225	1,30	4,3	цирконій
23	255	1,60	4,1	нерж. сталь

24	225	1,40	4,2	цирконій
25	235	1,55	4,1	нерж. сталь
26	245	1,30	4,3	цирконій
27	255	1,60	4,6	нерж. сталь
28	260	1,55	4,7	цирконій
29	255	1,55	4,1	нерж. сталь
30	250	1,45	4,4	цирконій

Таблиця 3

Перерізи взаємодії нейтронів з хімічними елементами та нуклідами при
 $E_0 = 0,0253 \text{ эВ}, 10^{-24} \text{ см}^2$

Елемент або нуклід	Значення мікроскопічного перерізу		
	Радіаційне захоплення	Розсіювання	Ділення
Гідроген ^1_1H	0,332	20,4	-
Кисень $^{16}_8\text{O}$	0,00027	3,76	-
Дейтерій ^2_1D	0,00053	3,3	-
Бор $^{10}_5\text{B}$	759	3,6	-
	3837	2,23	-
Цирконій $^{90}_{40}\text{Zr}$	0,185	6,4	-
Залізо $^{56}_{26}\text{Fe}$	2,55	10,9	-
Уран $^{235}_{92}\text{U}$	97,4	13,8	583,5
	2,71	8,9	-
	45,3	8,2	529,9
Плутоній $^{241}_{94}\text{Pu}$	363	11	1015
	267,2	7,7	744,0

Перелік джерел

1.Верхівкер Г.П., Кравченко В.П. Основи розрахунку та конструювання ядерних енергетичних реакторів. Підручник / В 360/ Під заг.ред. В.О.Дубковського,- Одеса: ТЕС, 2008. – 409 с. / 35 прим./

2. Широков С.В. Фізика ядерних реакторів. Навчальний посібник. – Вид. 2-е – К., 1998. – 288 с.: іл./ 10 экз./

3.Погосов О.Ю., Дубковський В.О. Іонізуюча радіація: радіоекологія, фізика, технології, захист. - Одеса, наука та техніка, 2013. - 804 с. /40 прим./