

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2018, 2(53): 36–44
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2018.02.036>

УДК 620.92

В.Д. БІЛОДІД, канд. техн. наук, ст. наук. співр.
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБЛЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ АТОМНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ ЗА МЕТОДОЛОГІЄЮ ПОВНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ. ЧАСТИНА 1. ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА БУДІВНИЦТВО

Приведені результати дослідження з визначення ефективності вироблення електричної енергії атомними електростанціями з реакторами ВВЕР-1000 за методологією повних енергетичних витрат. Визначення ефективності технологій за цією методологією опубліковано раніше. У частині 1 визначено значення повних енергетичних витрат на будівництво АЕС. У частині 2 будуть оприлюднені розрахунки щодо витрат енергії на ядерне паливо. В частині 3 передбачено висвітлення питань щодо витрат енергії на експлуатацію АЕС впродовж 40 років, витрати на її ліквідацію та визначення остаточної ефективності вироблення електроенергії на АЕС. Частини 2 та 3 будуть опубліковані в наступних номерах збірника.

Ключові слова: атомна електростанція, повні енергетичні витрати, ефективність вироблення електроенергії.

У роботі [1] опубліковано методику визначення ефективності вироблення електроенергії енергетичними об'єктами за методологією повних енергетичних витрат. Її суть полягає в тому, що на першому етапі визначаються повні енергетичні затрати для усіх стадій життєвого циклу енергоустановки. Визначаються оціночні результати роботи енергоустановки за весь період її експлуатації. Обчислюється корисний енергетичний ефект від роботи енергоустановки за формулою:

$$E_{kor} = E - \varphi \sum_{i=1}^n E_{b_i} - \sum_{j=1}^m E_{e_j} - E_{ut},$$

де E – сумарна кількість енергії, що виробляється енергоустановкою за весь термін її існування t_e років та передається на споживання, Дж; φ – коефіцієнт розширеного відтворення енергетичного виробництва (може набувати значень від 1,05 до 2 і більше залежно від заданих умов); E_{b_i} – сумарні витрати енергії на створення i -го елемента енергоустановки, Дж; n – кількість елементів

установки, шт.; E_{e_j} – затрати енергії на експлуатацію j -ї статті витрат установки впродовж t_e років її існування (повернення кредитів, ремонт, комплектуючі, заробітна плата персоналу, оплата податків та інших витрат, пов'язаних з функціонуванням та обслуговуванням установки, тощо), Дж; E_{ut} – затрати енергії на ліквідацію енергоустановки та утилізацію залишків після закінчення терміну її експлуатації, Дж.

На другому етапі визначаються коефіцієнт ефективності технології (установки) (позначення κ), фізична суть якого полягає у тому, наскільки енергія, що виробляється установкою перевищує затрати енергії на створення, функціонування та ліквідацію технології (установки), а також коефіцієнтом енерговіддачі (позначення ω_e) технології (енергоустановки), який за своєю суттю є аналогом ККД установки. Отже маємо:

$$\kappa = \frac{E}{E - E_{kor}}, \text{ або } \kappa = \frac{E}{\varphi \sum_{i=1}^n E_{b_i} + \sum_{j=1}^m E_{e_j} + E_{ut}}$$

© В.Д. БІЛОДІД, 2018

та

$$\omega_e = \frac{E_{kor}}{E}, \text{ або } \omega_e = 1 - \frac{\varphi \sum_{i=1}^n E_{b_i} + \sum_{j=1}^m E_{e_j} + E_{ut}}{E}.$$

Результати розрахунків за цією методологією щодо ефективності атомних електростанцій (АЕС) у літературі відсутні.

Таким чином метою цієї статті є висвітлення результатів обчислень ефективності вироблення електроенергії АЕС для правильної оцінки щодо реальної енергетичної ефективності їх роботи. У частині 1 цієї статті висвітлюються результати оцінок щодо повних енергетичних витрат на будівництво АЕС.

Оцінку ефективності можна зробити для діючих АЕС. Але зараз це не доцільно, оскільки вони збудовані і мають працювати. Порівняння ефективності нових АЕС з показниками ефективності інших типів електростанцій (тепловими на різних видах органічного палива, наприклад вугілля, природний газ, нафтопродукти, відходи біомаси, низькосортні види палив та інших, сонячними електростанціями різного типу (фотоелектричні, термодинамічні, комбіновані), геотермальними, вітровими та іншими) дозволить визначитися з їх перспективністю та доцільністю будівництва у найближчому майбутньому. За це майбутнє прийнята перспектива новацій на період до 2035 р., що визначено «Енергетичною стратегією України на період до 2035 року «безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність»» [2]. І хоча зазначена стратегія має ряд недоліків та не узгоджується з баченням енергетичної стратегії на цей період в НАН України, відображеному у роботі [3], документ [2] є офіційним нормативним документом і тому виконання її положень є обов'язковим.

Загальна характеристика АЕС

Для оцінки ефективності за основу приймаємо характеристики АЕС з серійним реактором ВВЕР-1000/320 за уніфікованим проектом [4]. Компонівка такої АЕС передбачає, що кожен блок, який включає ядерний реактор, парогенератори, головні циркуляційні насоси та трубопроводи 1-го контуру, трубопроводи 2-го контуру, турбоагрегат і допоміжне обладнання, розташовується в окремій будівлі.

Головною уніфікованою станцією такого типу стала Запорізька АЕС, будівництво якої почалося на березі Дніпра в 1979 р. Згодом всі нові АЕС будувалися за даною схемою: моноблокові енергоблоки в Україні були введені на Рівненській та Південноукраїнській АЕС. Принципову схему такої АЕС наведено на рис. 1, загальний вигляд (фото) Запорізької АЕС з 6-ма енергетичними реакторами типу ВВЕР-1000 [5] – на рис. 2.

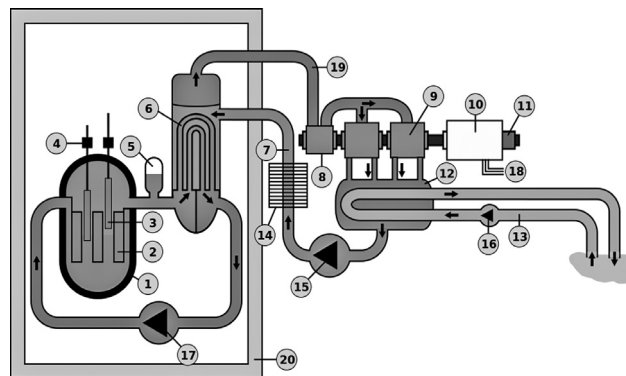


Рисунок 1. Принципова схема АЕС з реакторами ВВЕР-1000 [5]

- 1 — реактор, 2 — паливо, 3 — регульовальні стрижні, 4 — приводи СУЗ, 5 — компенсатор тиску (КТ), 6 — теплообмінні трубки парогенератора, 7 — подача живильної води в парогенератор, 8 — циліндр високого тиску турбіни (ЦНВ), 9 — циліндр низького тиску турбіни (ЦНТ), 10 — генератор, 11 — збудник, 12 — конденсатор, 13 — система охолодження конденсаторів турбіни, 14 — підігрівачі, 15 — турбоживильний насос, 16 — конденсатний насос, 17 — головний циркуляційний насос (ГЦН), 18 — підключення генератора до мережі, 19 — подача пари на турбіну, 20 — гермооболонка



Рисунок 2. Фото Запорізької АЕС [5]

На площадці АЕС, окрім головного корпусу, в якому розміщене основне технологічне обладнання, як правило, розміщені і інші споруди.

На рис. 3 наведено приклад розміщення окремих споруд на території АЕС при використанні природних джерел для технічного водопостачання (річка, озеро, море) (на рис. 3 поз. 2) [6]. При застосуванні градирень їх розміщення можливе на місці зображеного на рис. 3 водоймища, або поряд з розподільчими пристроями (поз. 4).

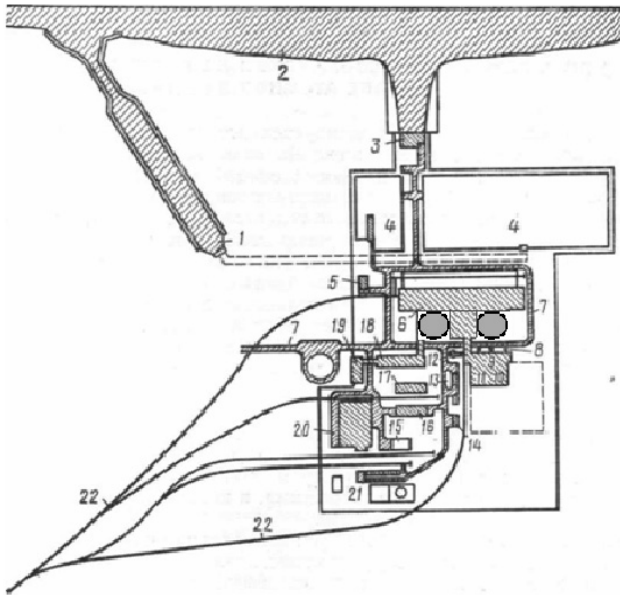


Рисунок 3. Приклад генерального плану АЕС [6]

- 1 – скидний канал; 2 – річка; 3 – насосна система технічного водопостачання; 4 – розподільчі електричні пристрої; 5 – азотно-киснева станція; 6 – головний корпус; 7 – під'їзна автодорога; 8 – трубопроводи різних радіоактивних відходів; 9 – корпус спецводоочистки; 10, 11 – могильники; 12 – вентиляційна труба; 13 – пожежна охорона, 14 – гараж; 15 – склади; 16 – допоміжна котельня; 17 – хімводоочистка; 18 – санітарно-побутовий корпус; 19 – адміністративний корпус; 20 – об'єднаний допоміжний корпус з майстернями; 21 – мастильне господарство; 22 – залізничні колії

На енергоблоках з реакторами ВВЕР-1000 встановлюється 1 турбіна потужністю 1000 МВт з частотою обертання 3000 або 1500 хв⁻¹. Можливим варіантом є встановлення 2-х турбін потужністю по 500 МВт кожна. У системі охолодження конденсаторів турбін на АЕС можуть використовуватися природні водойми або баштові градирні, штучні водосховища.

Довідник будівельника [4] містить інформацію щодо обсягів промислового будівництва АЕС. Слід очікувати, що з часу виходу довідника, завдяки науково-технологічному прогресу ці обсяги могли зменшитися. Однак, з того часу вимоги до безпеки АЕС (аварії на Чорнобильській АЕС та АЕС Фукусіма) суттєво збільшилися. Очевидно збільшилися і об'єми будівельних робіт та обсяги технологічного обладнання (його складність – а отже і енергетичні витрати при його виготовленні).

Враховуючи вищенаведене, для розрахунків обсягів робіт будемо користуватися даними [4] без змін, а при обчисленні повних енергетичних

витрат окремих оговорених компонентів будемо вводити відповідні коефіцієнти.

Питомі трудовитрати, за даними [4], при будівництві АЕС коливаються в межах 3–5 (чол.·днів)/кВт. З урахуванням складності та вимог до якості робіт на АЕС для розрахунків приймаємо більше значення трудовитрат 5 чол.·днів/кВт. Т.ч., загальні трудовитрати на один енергоблок АЕС з реакторами ВВЕР-1000 потужністю 1 ГВт складуть 5·10⁶ чол.·днів.

Питомі техніко-економічні показники спорудження головного корпусу при будівництві АЕС з реактором ВВЕР-1000 визначено за даними [4]:

- будівельна кубатура 0,629 м³/кВт;
- об'єм бетону та залізобетону 0,116 м³/кВт;
- виймка ґрунту 3,0 м³/кВт;
- зворотна засипка ґрунту і насипи 3,0 м³/кВт;
- маса металу будівельної частини 28,5 кг/кВт;
- маса технологічного обладнання 18,8 кг/кВт.

При визначенні повних енергетичних затрат в компоненти АЕС важливим є питання походження цих елементів. Якщо вони виготовляються в Україні, енергоємність визначатимемо за методикою [1]. Енергоємність імпортованих складових пропонується визначати за такою формулою:

$$E_{imp} = 29,3 \cdot 10^6 e_{vvp} K_{US\$} k_{NBU}, \text{ Дж,}$$

де e_{vvp} – енергоємність ВВП, кг у.п./грн; $K_{US\$}$ – вартість імпортованих складових, US\$; k_{NBU} – курс валюти за ставкою національного банку України на момент придбання імпортованого компоненту, грн/US\$.

Енергоємність ВВП щорічно змінюється і тому потрібно визначитися з розрахунковим значенням цього показника на якийсь період, наприклад на період до 2035 р., відповідно до [2]. У 2014 р., за даними [7], цей показник для України мав значення 0,31 кг н.е./ US\$, або 0,097 кг у.п./грн при значенні паритету купівельної спроможності (ПКС) долара США до 4,58 грн/US\$2010). Відповідно до прогнозу [2], цей показник зменшуватиметься з інтенсивністю 3,8% на рік. Отже його середнє значення за період 2014–2035 рр. буде $e_{vvp} = 0,22$ кг н.е./US\$ (ПКС).

Важливим є питання про зміну значення ПКС за цей період. За 2005–2014 рр. він мав значення, наведені у таблиці, які визначено за даними статистики України стосовно реального ВВП та інформацією статистичних збірників МЕА за 2007–2016 рр.

Таблиця – Паритет купівельної спроможності (ПКС) долара США в Україні

Роки	2005	2006	2007	2008	2009	
ПКС, грн/ US\$	1,54	1,77	2,17	2,79	3,17	
Роки	2010	2011	2012	2013	2014	2005–2014
ПКС, грн/ US\$	3,915	4,525	4,16	4,22	4,58	3,06

З таблиці видно, що значення ПКС у різні періоди змінювалося з різною інтенсивністю. Так з 2005 р. до 2009 р. його значення зросло в середньому на 20,6% щорічно. У період 2009–2014 рр. – щорічний приріст склав 8,6%, а в період 2011–2014 рр. – лише 4%. Середні прирости за 2005–2014 рр. склали 11,5%. Оскільки інтенсивність приростів ПКС знижується, приймаємо значення цього приросту на майбутні 20 років у розмірі 5% щорічно. Т.ч., значення ПКС у 2035 р. досягне 12,4 грн/US\$ (середнє значення за 2018–2035 рр. – 8,5 грн/US\$).

З урахуванням вищенаведеного:

$$e_{\text{впр}} = 0,22 \cdot 10 / 7 / 8,5 = 0,037 \text{ кг у.п./грн.}$$

Щодо значення k_{NBU} за період до 2035 р. – приймаємо для розрахунку, що річна інфляція за період 2018–2035 рр. знизиться від 10 до 2% (середнє значення 6%). Т.ч., середнє значення буде: $k_{\text{NBU}} = 48$ грн/US\$. (при курсі у 2017 р. $k_{\text{NBU}} = 26$ грн/US\$). Приймаємо також, що будівельні роботи та необхідні матеріали для будівництва на 80% українського походження. Імпортні складові в технологічному обладнанні – 50%.

Об'єми будівельно-монтажних робіт можна оцінити за загальними капітальними затратами в будівництво АЕС.

Дослідження [8] показали, що капітальні витрати на будівництво зростають як для ТЕС, так і для АЕС. Так за розрахунками Агентства з Ядерної Енергії (АЯЕ) середньозважені капітальні витрати в АЕС, що будувалися в країнах Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР) вирости з 1900 US\$/кВт в кінці 1990-х рр. до 3850 US\$/кВт у 2009 р.

Разом з тим автори дослідження [8] радять обережно ставитися до цих даних, оскільки вони не узгоджуються з даними інших джерел. Так в Управлінні Енергетичної Інформації США (EIA) зроблені підрахунки, з яких випливає, що реальна вартість АЕС, побудованої в США на початку 1960-х рр., вирости з 1500 до 4000 US\$/кВт в середині 1970-х рр. Це пов'язано із збільшенням нормативних вимог (зокрема змін в конструкціях, які потрібно реалізувати на АЕС, для їх оснащення новим модифікованим обладнанням), проблемами ліцензування, задачами управління проектами тощо. У доповіді EIA у 2010 р. «Оновлена оцінка капітальних витрат для виробництва електроенергії електростанціями» дається оцінка, що нові АЕС матимуть питомі витрати на рівні 5339 US\$/кВт.

Разом з тим існує значне варіювання капітальних витрат у різних країнах, що особливо характерне для індустриальних країн Східної Азії та розвинених країн Європи і Північної

Америци, що має безліч пояснень, у тому числі диференціацію витрат на оплату праці.

За оцінками французької національної аудиторської організації (Судова Рахункова палата) питомі капіталовкладення у французькі АЕС збільшилися від 1070 євро/кВт (перший з 50-ти PWR, введений у експлуатацію в 1978 р.) до 2060 євро/кВт (реактори 1 та 2, введені у дію у 2000 р. в Fessenheim). За прогнозом для нових АЕС ця вартість сягатиме 3700 євро/кВт, або 5180 US\$/кВт (наприклад для АЕС в Flamanville). Можна стверджувати, що багато в чому ця ескаляція вартості викликана зменшенням масштабів програми будівництва 2000 р. (порівняно з тим, коли французи вводили в експлуатацію по 4-6 нових реактори PWR за рік упродовж 1980-х рр.).

Китай заявив, що він очікує зниження витрат на споруджуваних АЕС від 2000 US\$/кВт до 1600 US\$/кВт. Цю оцінку зроблено для реактора AP1000, який використовується EIA в США. Це буде означати, що АЕС з реакторами AP1000 в США буде коштувати приблизно втричі більше, ніж аналогічна АЕС, побудована в Китаї. Різні ставки оплати праці в двох країнах всього лише частина пояснення. Очевидно, є і інші причини такого розходження.

Велика тривалість будівництва призводить до зростання фінансових витрат, і в минулому вона була завеликою. В Азії терміни будівництва, як правило, коротші. Наприклад японські АЕС нового покоління потужністю 1300 МВт, які почали будуватися в 1996 і 1997 рр., були побудовані в терміни трохи більші 4-х років. І тому тривалість будівництва АЕС сьогодні від 48 до 54 місяців є типовою.

Для українських нових АЕС спрогнозувати питомі капіталовкладення непросто. Разом з тим відомо, що згідно з розпорядженнями Кабінету Міністрів України №146-р та №147-р від 17.03.2003 р. були затверджені техніко-економічні розрахунки на добудову енергоблоку №2 на Хмельницькій АЕС (ХАЕС-2) та №4 на Рівненській АЕС (РАЕС-4) з реакторами ВВЕР-1000. Вартість добудови цих енергоблоків оцінено в 6736,3 млн грн, тобто в середньому 3368,15 грн/кВт. Про ці ж витрати йдеться у рішенні Колегії Мінпаливенерго України [9]. З [9] випливає, що на будівництво ХАЕС-2 витрачено коштів у розмірі 2180,7 грн/кВт, а на будівництво РАЕС-4 – 3020 грн/кВт. Довіри до цих цифр немає, оскільки невідомо, як саме вони витрачалися по роках при гіперінфляції.

Цевідображає наступна інформація. У 2012 р. Кабінет Міністрів України схвалив техніко-економічне обґрунтування будівництва енергоблоків № 3 та 4 Хмельницької АЕС потуж-

ністю 2 ГВт загальною кошторисною вартістю 36 млрд 758 млн 415,275 тис. грн [10]. Будівельно-монтажні роботи оцінено в 5,955 млрд грн, устаткування – в 23,588 млрд грн, пусконаладжувальні роботи – 249,3 млн грн. За розрахунками, інші витрати складуть 6,62 млрд грн. Окремо підрахована вартість ядерного палива для першого завантаження – 2,07 млрд грн, та фінансування будівництва об'єктів соціального призначення на території зони спостереження – 735,168 млн грн.

Т.ч., загальні витрати в зазначені енергоблоки оцінено в 39,566 млрд грн, або 19783 грн/кВт. Це складатиме приблизно 4030 US\$/кВт (за курсом 4,91 грн/US\$, що відповідає реальній купівельній спроможності долара в Україні за даними МЕА на 2010 р. [7]). Отже ця величина є близькою до оцінок вартості АЕС у США (EIA – див. вище) та у Франції.

Прийемо середньозважену вартість АЕС за всіма наведеними країнами (США, Франція, Китай та Україна):

$$k_{AES} = (5359 + 5180 + 1600 + 4030) / 4 = 4037 \text{ US\$/кВт.}$$

Частка будівельно-монтажних робіт у загальному обсязі грошових затрат на створення АЕС складає, за даними [10], 15%. Разом з тим ці обсяги за іншими даними сягають 40%. Приймаємо їх значення на рівні 30% від прямих витрат на будівництво та поставку технологічного обладнання (основного та допоміжного).

Витрати коштів на будівництво АЕС включають і інші складові, серед яких основні:

1. витрати на наукові і пошукові роботи, проектні та конструкторські розробки (до 3% – 120 US\$/кВт);

2. прями витрати на будівництво та поставку технологічного обладнання (основного та допоміжного) (85% – 3431,5 US\$/кВт);

3. вартість землі (яка буде зайнята АЕС) (до 1% – 40,4 US\$/кВт);

4. вартість робіт з підготовки необхідної інфраструктури для будівництва (під'їдні дороги, енергопостачання, допоміжні об'єкти будівельних та монтажних організацій, адміністрування будівництва, ліцензування окремих видів діяльності тощо) (до 8% – 323 US\$/кВт);

5. витрати, пов'язані з наданням кредитів, збільшенням вартості проекту в результаті інфляційних процесів, та іншими непередбачуваними факторами (до 3% – 120 US\$/кВт).

Отже, обсяги будівельно-монтажних робіт будуть: $k_{ob} = 3431,5 \cdot 0,3 = 1030 \text{ US\$/кВт.}$

Витрати на поставку технологічного обладнання (основного та допоміжного) – 2402 US\$/кВт.

Повні енергетичні витрати на допоміжні роботи при будівництві АЕС

До них віднесемо витрати за пунктами 1, 3–5. Ці витрати сумарно складають за вартістю 15% сумарної вартості АЕС.

$$e_{dop} = 29,3 \cdot 10^6 \cdot e_{vvp} \cdot k_{dop} \cdot k_{PKS} = 29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,037 \cdot 4037 \cdot 0,15 \cdot 8,5 = 5,58 \text{ ГДж/кВт.}$$

Повні енергетичні витрати на будівництво та поставку технологічного обладнання (основного та допоміжного)

Енергоємність земляних робіт. Найбільше розповсюдження в будівництві отримав механічний спосіб виїмки та зворотної засипки ґрунтів при якому ґрунт відділяється від масиву внаслідок контактної силової дії на нього землерийного робочого органу. Енергоємність такого способу становить від 0,05 до 0,6 кВт·г/м³ [11], або від 0,18 до 2,16 МДж/м³. Для розрахунків приймаємо значення 1,5 МДж/м³. При цьому певна частина робіт з виїмки та засипки ґрунту виконується вручну. Енергоємність цього процесу, за даними [12], складає 240 МДж/м³. Об'єми робіт виконаних ручним способом можна прийняти у обсязі 5% від загальної потреби. Отже, при визначених умовах, енергоємність земляних робіт (виїмка ґрунту та його зворотна засипка), буде:

$$E_{gr} = (3 + 3) \cdot 10^6 \cdot (0,95 \cdot 1,17 + 0,05 \cdot 240) \cdot 10^6 = 79,8 \text{ ТДж.}$$

Енергоємність створення залізобетонних конструкцій. Як зазначено в [13]: «В середньому загальнозаводська енергоємність спеціальних залізобетонних конструкцій на підприємствах, що їх випускають досягає 1700–3000 МДж/м³»

Виготовлення 1 м³ залізобетону марки М400 з питомою вагою 2,2 т/м³ потребує, за даними [14], 200 – 300 кг/м³ цементу і 200 кг сталеві арматури. При цьому пропорції води, цементу, піску, щебню і арматури в масі залізобетону становлять 0,34:1:1,2:2,7:0,47 відповідно [15]. З урахуванням опосередкованих витрат енергії (крім прямих) у розрахунки вводиться коефіцієнт 2.

За таких умов, враховуючи дані, стосовно енергоємності складових залізобетону, наведені в [13] отримуємо середню повну питому енергоємність залізобетону 40,0 МДж/м³.

Рівень споживання енергії при виробництві сталі значно залежить від виробничого процесу, при цьому найкращі показники досягаються при виробництві сталі з лому і становлять 4,5–8,5 ГДж/т проти 19–29 ГДж/т для заводів повного циклу [16]. Разом з тим необхідно орієн-

туватися не на показник виплавки сталі, а на показник енергоємності сталюного прокату. Згідно з даними [17], енергоємність сталюного прокату (сталь киснево-конверторна марки ст.20) складає 1506 кг у.п./т, або 44,14 ГДж/т. З урахуванням можливого прогресу у виробництві прокату та різної якості сталі різних марок (сталь арматурна, труби, прокат різних профілів, листовий прокат, марка сталі тощо) усереднено приймаємо для розрахунків значення енергоємності сталі 40 МДж/кг.

Слід зауважити, що при визначенні енергоємності сталюного прокату необхідно врахувати, окрім прямих витрат, також непрямі енергетичні витрати, а саме витрати енергії на основні виробничі фонди в металургії, амортизаційні відрахування від цих фондів, витрати енергії на поточні та капітальні ремонти фондів, витрати енергії на оплату праці сталеварів, оплату податків та зборів, отримання прибутків, на інші потреби. І тому повні енергетичні витрати на отриману металопродукцію будуть суттєво більшими. На скільки саме більшими – буде визначено у подальших дослідженнях. Для оцінок цієї статті приймемо коефіцієнт збільшення 1,675 (враховуючи, що прямі енерговитрати у даному випадку складають 60% від загальних). І тоді розрахункова енергоємність сталі буде на рівні 67 МДж/кг.

Енергоємність монтажних робіт оцінюється значенням 44,72 МДж/т [18] (з урахуванням складності робіт на АЕС для розрахунку прийнято значення 60 МДж/т).

Оскільки збудовані споруди потребують облаштування (штукатурка та облицювання стін, підлог, малярні роботи, освітлення, водопровід, каналізація, вентиляція тощо) у розрахунок енерговитрат введемо коефіцієнт 1,2 на це збільшення.

З урахуванням середньої питомої ваги залізобетону (при будівництві АЕС часто використовують важкі бетони) 2,2 т/м³, а також у припущенні, що енергоємність сталюних конструкцій при будівництві удвічі перевищує енергоємність прокату, повна енергоємність спорудження головного корпусу АЕС з реактором ВВЕР-1000 становитиме:

$$E_{g.k} = 1,2 \cdot [79,8 + 116 \cdot 40 + 28,5 \cdot 67 \cdot 2 + 270 \cdot 60] \cdot 10^{12} = 29,6 \text{ ПДж.}$$

Фізичні обсяги робіт, необхідних для будівництва головного корпусу, за оцінками наведеними в [4], становлять ~45% від загального обсягу будівельних робіт при спорудженні АЕС. Тобто з урахуванням цього загальна повна енергоємність будівельних робіт буде:

$$E_{b.AES} = 29,6 / 0,45 \approx 65,8 \text{ ПДж.}$$

Енергоємність основного та допоміжного обладнання

У припущенні, що на кожному енергоблоку встановлено турбіну К-1000-60/1500 з турбогенератором ТВВ-1000-4 і конденсатором К-33-160 маємо загальну вагу основного турбогенераторного та електротехнічного обладнання $(180+667+1890) = 2737$ т. Якщо прийняти, що енергоємність основного турбогенераторного та електротехнічного обладнання АЕС визначається за стандартом РФ [12], який встановлює, що енергоємність продукції машинобудування з урахуванням енергоємності попередніх виробництв, приймається в енергетичному еквіваленті 144 МДж/кг, з урахуванням непрямих витрат енергії (коефіцієнт 2,0) та складності обладнання для АЕС (коефіцієнт 1,5), то повні енергетичні витрати на створення основного турбогенераторного та електротехнічного обладнання енергоблоку з реактором ВВЕР-1000 для АЕС будуть такими:

$$E_{T.AES} = 2737 \cdot 10^3 \cdot 144 \cdot 10^6 \cdot 1,5 \cdot 2 = 1,18 \text{ ПДж.}$$

Раніше було прийнято, що частка імпортного обладнання у загальному його обсязі (18,8 т/кВт) складатиме 50%. Отже все інше обладнання вітчизняного виробництва матиме масу 9,4 т/кВт. Отже, повні енерговитрати на його створення в Україні будуть такими:

$$E_{T.Obl.U} = (9400 - 2737) \cdot 10^3 \cdot 144 \cdot 10^6 \cdot 2 = 1,92 \text{ ПДж.}$$

На рис. 4 приведено принципову схему реакторної установки ВВЕР-1000. Елементи цієї схеми за металоємністю переважають металоємність машинної зали [5]. Загальна маса цієї системи складає 4074 т [19]. При цьому енергоємність виготовлення обладнання 1-го контуру ВВЕР-1000 оцінюється значно вищою, ніж обладнання 2-го контуру (сама реакторна установка з товщинами корпусу до 400 мм, трубопроводи та інше обладнання з надвисоким рівнем надійності). Т.ч., обладнання реакторної установки оцінимо вдвічі дорожчим, ніж інше обладнання. Оскільки все обладнання реакторного відділення вірогідно буде імпортним, то при вартості імпортних складових 1200 US\$/кВт (див. вище) його вартість оціночно складатиме 0,2 US\$/(т·кВт). Все інше імпортне технологічне обладнання з масою 4326 т буде мати питому вартість 0,1 US\$/(т·кВт).

Отже, повні енергетичні витрати на імпортне технологічне обладнання будуть такими:

$$E_{imp.T/Obl} = 29,3 \cdot 10^6 e_{vvp} K_{USS} k_{NBU} N = \\ = 29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,037 \cdot 48 \cdot 10^6 \cdot (0,2 \cdot 4074 + \\ + 4326 \cdot 0,1) = 62,44 \text{ ПДж.}$$

Як видно з наведеного розрахунку витрати на обладнання по імпорту через завищений курс валюти є непропорційно великими.

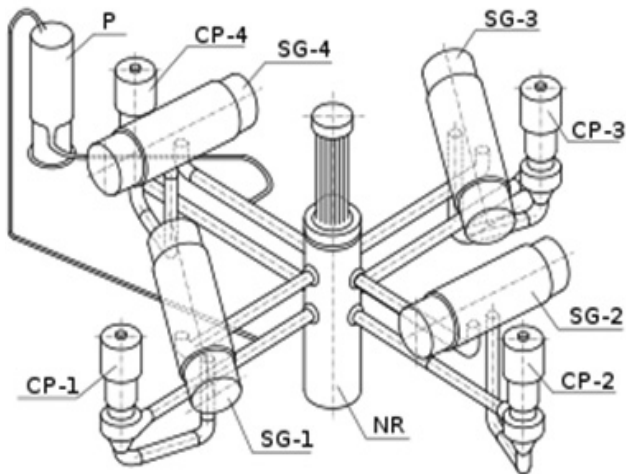


Рисунок 4. Принципова схема першого контуру серійної ядерної установки типу ВВЕР-1000 [5]
 CP-1,2,3,4 – головні циркуляційні помпи;
 SG-1,2,3,4 – парогенератори;
 NR – ядерний реактор; P – компенсатор тиску

Якщо ж підрахувати ці витрати за прогнозними значеннями ПКС 8,5 грн/US\$, то вищенаведені витрати скоротяться до 11 ПДж.

Отже сумарні витрати енергії на основне та допоміжне обладнання з урахуванням припущення, що прямі витрати енергії складають 70% від загальних, будуть за варіантом незмінності політики НБУ і середній інфляції гривні 6% за рік:

$$E_{Obl} = (1,18 + 1,82 + 62,44) \cdot 100 / 70 = 93,5 \text{ ПДж.}$$

Ті ж самі витрати при курсі гривні за значенням ПКС:

$$E'_{Obl} = (1,18 + 1,82 + 11) \cdot 100 / 70 = 20 \text{ ПДж.}$$

Енерговитрати на оплату праці будівельників

Енерговитрати на оплату праці будівельників визначатимемо за формулою:

$$E_{z.bud} = T_{bud} \cdot e_z \cdot F_z, \text{ Дж,}$$

де T_{bud} – трудовитрати на спорудження АЕС, чол. дні; e_z – питома енергоемність трудовитрат, Дж/грн; F_z – середньоденний фонд заробітної платні будівельників, грн/люд.день.

Питома енергоемність трудовитрат визначимо за формулою з роботи [1]:

$$e_z = 29,3 \cdot 10^6 \alpha_z \cdot e_{vyp}, \text{ Дж/грн,}$$

де α_z – частка у структурі ВВП, що пішла на оплату праці найманих працівників (за даними статистичних збірників [20] за 2005–2015 рр. коливалася в межах 46,3–50,5%; середнє значення 48,4%; і тоді коефіцієнт $\alpha_z = 0,484$).

Отже, питома енергоемність трудовитрат буде:

$$e_z = 29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,484 \cdot 0,037 = 0,524 \cdot 10^6 \text{ Дж/грн.}$$

Слід зазначити, що значення цього показника за фактичними статистичними даними у 2010 р. визначено 1,64 МДж/грн [1], тобто прогнозується зниження його середнього значення за період 2010–2035 рр. в 3,1 рази.

Ще складнішим є прогнозування рівня заробітної платні на період до 2035 р. (фонду заробітної платні будівельників), коли буде будуватися нова АЕС. Термін такого будівництва може бути досить тривалим, однак для нашого розрахунку приймемо його в 5 років на один енергоблок. За даними [21], за станом 2010 р. середня заробітна плата в країнах ЄС складала 244 грн/год (~44 тис. грн за місяць). При цьому мінімальне зростання рівнів зарплат спостерігається у Німеччині (19,4% на рік). Отже приймаючи, що приріст зарплат в ЄС за період 2011–2035 рр. буде дещо нижчим сучасного в Німеччині (приймаємо 15% на рік), отримуємо середній рівень зарплат в ЄС у 2035 р. на рівні 1,45 млн грн/міс (фантастична цифра). Такий рівень в Україні є малоймовірним. Тому приймаємо на 2035 р. рівень зарплати в Україні таким як в країнах ЄС, зафіксований у 2010 р., тобто 44 тис. грн на місяць. Середня ж зарплата за 25 років буде на рівні ~25 тис. грн/міс (~1,0 тис. грн/люд.день).

Тому, з урахування діючого коефіцієнту нарахування на фонд оплати праці 1,22 (відратування у фонди соціального страхування (пенсійний, соціальний, травматизму та допомоги по безробіттю), повна енергоемність заробітної плати будівельників при питомих трудовитратах 5 люд.днів/кВт, буде:

$$E_{z.bud} = 5 \cdot 10^6 \cdot 0,524 \cdot 10^6 \cdot 1000 \cdot 1,22 = 3,2 \text{ ПДж.}$$

Витрати енергії на отримані прибутки будівельних та монтажних підприємств (фірм)

Ці витрати прямо пропорційні отриманим прибуткам, які будемо оцінювати за нормою в 10% від об'ємів будівельно-монтажних робіт (можлива інша норма, при її обґрунтуванні).

Питома енергоемність прибутків за [1] визначатимемо з формули:

$$e'_{pod} = 29,3 \cdot 10^6 \beta_{pr} e_{vyp}, \text{ Дж/грн,}$$

де β_{pr} – частка валового національного прибутку у структурі ВВП.

Зважаючи на те, що за, даними [20], значення коефіцієнта β_{pr} по роках практично постійне (коливання біля значення ~40%), приймаємо $\beta_{pr} = 0,4$ і отримуємо:

$$e'_{pr} = 29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \cdot 0,037 = 0,43, \text{ МДж/грн.}$$

Отже, при питомих об'ємах будівельно-монтажних робіт $D_b = 1030 \text{ US\$/кВт}$ та нормі прибутку 10% від доходів, отримуємо $Pr = 103 \text{ US\$/кВт}$. І тоді питома енергоемність прибутків:

$$e_{pr.b} = 103 \cdot 8,5 \cdot 0,43 \cdot 10^6 \approx 377 \text{ МДж/кВт.}$$

Витрати енергії на оплату податків та зборів будівельними та монтажними підприємствами (фірмами)

Питому енергоємність податків також можна визначити через значення енергоємності ВВП:

$$e_{pod} = 29,3 \cdot 10^6 \beta_{pod} e_{vvp}, \text{ Дж/грн,}$$

де β_{pod} – частка податків у структурі ВВП, за виключенням субсидій на виробництво та імпорт.

Зважаючи на те, що за даними [20] значення коефіцієнта β_{pod} по роках практично постійне (на рівні 12%), приймаємо значення $\beta_{pod} = 0,12$ і отримуємо:

$$e_{pod} = 29,3 \cdot 10^6 \cdot 0,12 \cdot 0,037 \approx 0,13 \text{ МДж/грн.}$$

Податкові ж навантаження на будівельно-монтажні організації і підприємства в Україні включають такі основні податки:

- з прибутку (ставка з 01.01.2014 р. 16% від прибутку [22]);
- на додану вартість (ПДВ) (ставка 17% від валового доходу [22]);
- інші податки та збори (оціночно до 5% від валового доходу будівельно-монтажних організацій).

Таким чином, сумарна ставка податків складе 23,6% від валового доходу будівельно-монтажних організацій. І тоді питомий обсяг податків буде:

$$p_{pod,b} = 0,236 \cdot D_b = 0,236 \cdot 1030 \cdot 8,5 = 2066 \text{ грн/кВт.}$$

Питомі енерговитрати на податки будівельників для АЕС складуть:

$$e_{pod,b} = e_{pod} \cdot p_{pod,b} = 0,13 \cdot 2066 = 268,6 \text{ МДж/кВт.}$$

Сумарні витрати енергії в будівництво енергоблоку АЕС

Загальна ж повна енергоємність будівництва АЕС, з урахуванням витрат енергії на підготовку будівництва, пошукові геологічні роботи, проектування АЕС (коефіцієнт 1,25), а також пусконаладжувальні роботи для АЕС потужністю 1 млн кВт (коефіцієнт 1,15) буде такою:

а) за варіантом незмінності політики НБУ і середній інфляції гривні 6% за рік:

$$E_{\Sigma, AES} = 1,25 \cdot 1,15 \cdot (5,58 + 65,8 + 93,5 + 3,2 + 0,377 + 0,269) \approx 242,5 \text{ ПДж;}$$

б) при курсі гривні за значенням ПКС:

$$E_{\Sigma, AES} = 1,25 \cdot 1,15 \cdot (5,58 + 65,8 + 20 + 3,2 + 0,377 + 0,269) \approx 137 \text{ ПДж.}$$

Витрати на житлово-комунальне забезпечення

Слід зауважити, що спорудження АЕС, як правило, викликає необхідність побудови міста-супутника для проживання обслуговуючого персоналу, допоміжних служб та їх сімей з відповідними житлово-комунальними та іншими службами. Ці витрати,

згідно [10], оцінимо у розмірі 2% від загальних, тобто вони складатимуть для АЕС потужністю 1 млн кВт 4,85 ПДж за варіантом а і 2,7 ПДж за варіантом б.

Повні витрати енергії на будівництво енергоблоку АЕС

Повні витрати енергії на будівництво енергоблоку АЕС потужністю 1 ГВт, з урахуванням витрат на житлово-комунальне забезпечення будуть на рівні 247 ПДж (варіант а), або 140 ПДж (варіант б). Питомі витрати енергії 247 та 140 ГДж/кВт, відповідно.

Повні енергетичні витрати в будівництво крупної АЕС

При будівництві АЕС з кількома енергоблоками є певне зниження питомих витрат енергії при збільшенні загальної потужності АЕС. Оскільки типова українська АЕС має від 2 до 6 енергоблоків, розглянемо варіант АЕС з 4 енергоблоками типу ВВЕР-1000. У цьому випадку питомі енерговитрати на будівництво будуть розраховані за формулою з [1] за варіантом а:

$$e_{\Sigma n} = e_{AES-bl} \cdot 1,2^{1,443 \cdot \ln \frac{N_b}{N_{AES}}} =$$

$= 247 \cdot 1,2^{1,443 \ln(1/4)} = 222 \text{ ГДж/кВт,}$ а за варіантом б – 126 ГДж/кВт.

Висновки до частини 1 статті

1. Визначено основні показники енергоємності створення об'єктів АЕС з реакторами ВВЕР-1000 за варіантом незмінності політики Національного банку України та інфляції гривні 6% на рік та при курсі гривні за значенням паритету купівельної спроможності долара США (в дужках), серед яких:

- питома енергоємність спорудження енергоблоку АЕС – 247 (140) ГДж/кВт;
- питома енергоємність крупної АЕС – 222 (126) ГДж/кВт.

2. Отримані результати дозволять оцінити енергетичну ефективність АЕС за методологією визначення повних енергетичних витрат.

1. Білодід В.Д. Повні енергетичні витрати на електроенергію, що виробляється енергетичними об'єктами. *Проблеми загальної енергетики*. 2017. №3(50). С. 23–32. <https://doi.org/10.15407/pge2017.03.023>.

2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» (Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18 серпня 2017 р. № 605-р).

3. Кулик М.М., Горбулін В.П., Кириленко О.В. Концептуальні підходи до розвитку енергетики України (аналітичні матеріали). К.: Інститут загальної енергетики НАН України, 2017. 78 с.

4. Турчин Н.Я., Агеев Г.С., Алексеев И.А. и др. Строительство тепловых и атомных электростанций справочник строителя. В 2-х т. / Под ред. П.С. Непорожного 3-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1985. Т. 572 с., Т. 639 с.
5. ВВЕР-1000 / Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%92%D0%95%D0%A0-1000>
6. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции / Изд. 2-е, перераб. и дополн. Учеб. для ВУЗ-ов. М.: Высш. школа, 1974. 359 с.
7. Key World Energy Statistics 2016. – Paris: IEA, 2016. – 80 p.
8. The Economics of Nuclear Power / Сайт World Nuclear Association. URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Economic-Aspects/Economics-of-Nuclear-Power>.
9. Рішення Колегії Міністерства палива та енергетики України від 07.04.2004 №3.3.
10. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 04.07.2012 №498-р. Про схвалення техніко-економічного обґрунтування будівництва енергоблоків № 3 і 4 Хмельницької атомної електростанції.
11. Волков Д. П., Алёшин Н.И., Крикун В.Я., Рынсков О.Е. Строительные машины: Учеб. для вузов по спец. ПГС под ред. Д.П. Волкова. М.: Высш. шк., 1988. 319 с.
12. Методика определения энергоёмкости при производстве продукции и оказании услуг в технологических энергетических системах: ГОСТ Р 51750-2001. [Действует с 2002.01.01]. URL: http://www.elec.ru/library/gosts_e01/gost_r_51750-2001/
13. Сбережение тепловой и электрической энергии при производстве бетона и железобетона. URL: <http://www.nestor.minsk.by/sn/2001/17/sn11708.html>.
14. ДСТУ Б В.2.7-43-96. Бетони важкі. Технічні умови. URL: <http://beton.dp.ua/pdf/2-7-43-96.pdf>
15. Расход арматуры на куб бетона. URL: <http://stroibeton.com/%D0%B1%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%BD/%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%85%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D1%8B%D0%BD%D0%B0%D0%BA%D1%83%D0%B1%D0%B1%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B0>.
16. Перспективы снижения энергоёмкости сталеплавильного производства на металлургических мини-заводах. URL: <http://steeltimes.ru/books/steelmaking/minizavod/15/15.php>.
17. Оцінка енергоефективності експортно-імпортної діяльності в галузях промисловості України / Звіт про НДР / Наук. кер. Гнідий М.В. К.: ІЗЕ НАН України, 2006. 75 с. (ДР №0104U003064).
18. Шалягин Г.Л., Полоз В.Н., Клыков М.С. Проектирование производства монтажных работ. Часть 1. Определение объёмов работ и выбор монтажных средств. Хабаровск. Министерство путей сообщения Российской Федерации, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, 1998. 48 с.
19. Статистичні щорічники України за 2005–2015 рр. Державна служба статистики України.
20. Середня зарплата в Євросоюзі — 244 гривні за годину. URL: <http://vkurse.ua/ua/economics/srednyaya-zarplata-v-evrosoyuze.html>.
21. Общее устройство реакторного отделения с реактором ВВЭР-1000. URL: <http://ecoatominf.ru/ustr-rost-aehs/obsh-ustr-reak-otde-reak-vveh.html>
22. Податковий кодекс України від 2 грудня 2010 року № 2755-VI / Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2011, № 13–17, ст.112.

Надійшла до редколегії 25.05.2018