СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЄМНИХ ВИРОБНИЦТВ

ISSN 2522-4344 (Online), ISSN 1562-8965 (Print). The problems of general energy, 2018, 3(54): 36–41
doi: https://doi.org/10.15407/pge2018.03.036

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 2. ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ НА ЯДЕРНЕ ПАЛИВО

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 опублікована раніше. У частині 1 статті були визначені повні енергетичні витрати на будівництво АЕС [1]. У частині 2 наводяться результати розрахунків щодо витрат енергії на отримання ядерного палива. У частині 3 передбачено висвітлення питань щодо витрат енергії на експлуатацію АЕС впродовж 40 років, витрати на її ліквідацію, на переробку відпрацьованого ядерного палива та визначення остаточної ефективності вироблення електроенергії на АЕС.

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

В першій частині статті, опублікованій у збірнику «Проблеми загальної енергетики» [1] наведено інформацію щодо загальних положень оцінки ефективності вироблення електроенергії за методологією повних енергетичних витрат, що остаточно викладена у роботі [2], загальна характеристика АЕС, щодо якої ведуться розрахунки, наведені результати розрахунків повних енергетичних витрат на будівництво АЕС з реакторами ВВЕР-1000.

Метою статті в цілому є висвітлення результатів обчислень стосовно ефективності вироблення електроенергії на АЕС задля правильної оцінки її реальної енергетичної ефективності. У частині 2 цієї статті висвітлюються результати оцінок щодо повних енергетичних витрат на ядерне паливо (ЯП) для АЕС з усіма його стадіями (видобуток уранової руди, її переробка та збагачення, виробництво тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ-ів), використання палива на АЕС, збереження (витримка) відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) на АЕС.

© В.Д. БІЛОДІД, 2018

Витрати енергії на ядерне паливо

В ядерній енергетиці ЯП, завантажене в ядерний реактор (ЯР) знаходиться там протягом кількох років. З причин, які обумовлені фізикою ЯР (необхідність мати в ЯР масу урану, що перевищує критичну з необхідним запасом реактивності, під час вигорання ЯП відбувається отруєння маси ЯП хімічними елементами, які утворюються в результаті ядерних реакцій) в ЯР на теплових нейтронах вигорає лише незначна частина ЯП (5–30%) [3].

Ядерно-паливний цикл (ЯПЦ) АЕС, за даними [4], можна розділити на три стадії:

– початкову стадію, що охоплює операції від видобутку уранової руди до поставки виготовлених ТВЕЛ-ів та їх транспортування на майданчик АЕС;

– стадію використання палива в ЯР АЕС, де енергія ділення використовується для виробництва теплової енергії, і тимчасового зберігання ВЯП на майданчику АЕС;

– завершальну стадію, яка починається з відправлення ВЯП у сховище, яке є окремою спорудою, або на завод з переробки ВЯП і закінчується остаточним видаленням засклених високоактив-

них відходів після переробки ВЯП), або безпосередньо капсульне захоронення ВЯП.

У звіті [4] аналізуються витрати на реалізацію двох варіантів ЯПЦ з реакторами PWR – pressurized water reactor (корпусний водо-водяний енергетичний реактор). При цьому передбачається, що витрати для реакторів з киплячою водою (BWR – boiling water reactor (ядерний реактор киплячого типу)) такої ж потужності з порівнянними часовими рамками пуску в експлуатацію і терміну служби аналогічні показникам ЯПЦ для реакторів PWR.

Варіант ЯПЦ, в якому ВЯП піддається переробці з метою відділення плутонію і залишкового урану від відходів, отриманих у процесі розділення, називають варіантом ЯПЦ з переробкою. За цим варіантом на переробному заводі з однієї тони збагаченого урану у ядерному паливі, що завантажується в ЯР, вилучається 11 кг плутонію та 0,9 т регенерованого урану, який є сировиною для виготовлення свіжого ЯП. Високоактивні відходи, які підлягають захороненню у цьому ЯПЦ складають величину ~0,47 м^3 на 1 тU, який завантажується в ЯР. Отже у цьому ЯПЦ для виготовлення 1 т ЯП необхідно додати свіжого ізотопно збагаченого уранового концентрату у кількості лише 0,1 тU. Це значить, що в процесах первинного видобутку уранової руди, її переробки та збагачення масштаби цієї промисловості зменшаться у 10 разів. Разом з тим, наявність у продуктах переробного заводу компонентів, які можуть використані для виготовлення ядерної зброї унеможливлюють у найближчі періоди будівництво такого заводу в Україні.

Другий варіант ЯПЦ, наведений в [4], зазвичай званий прямим похованням, передбачає захоронення ВЯП після, як правило, тривалого періоду зберігання та відповідної обробки. І хоча цей варіант є найбільш невигідним економічно, оскільки передбачає великі обсяги видобутку уранових руд, їх переробку та збагачення отриманого концентрату, а також велику кількість відходів, що підлягають похованню (1,5 м^3 на 1 тU, який завантажується в ЯР), для подальшого аналізу та розрахунків приймаємо саме його.

Витрати енергії у процесах ЯПЦ, пов'язані з операціями до завантаження ЯП у ЯР АЕС, будемо відносити до ЯП, а затрати енергії після передачі ВЯП на зберігання до інших підприємств, переробку на відповідних заводах чи поховання для вічного зберігання – до затрат на ліквідацію АЕС.

Видобуток і збагачення уранової руди

Уран широко поширений в земній корі і океанах, проте економічно вигідним його видобуток є можливим лише в тих місцях, де в результаті геологічних процесів зросла його локальна концентрація. В минулому у всіх економічно придатних уранових рудах звичайно містилося менше 0,5% урану, а в деяких випадках видобувалася руда, концентрація урану в якій падала до 0,04%. З іншого боку, в деяких родовищах концентрація урану в руді становить кілька відсотків, а недавно відкриті нові родовища, як правило, містять уранову руду ще з більш високою концентрацією. Кількість, якість і географічний розподіл уранових ресурсів докладно обговорюються в регулярних публікаціях ОЕСР/АЯЕ і МАГАТЕ, зокрема в останній за 2016 р. [5].

Уранова руда добувається або традиційним відкритим способом, або шахтними методами; потім на заводах з переробки руди (збагачувальних фабриках) з використанням хімічних методів, вибір яких залежить від конкретної форми мінералу, з якого вилучається уран в процесах роздроблення руди. Такі методи зазвичай дозволяють вилучати до 85–90% урану, що міститься в руді. Радіоактивність виділеного урану дуже низька. Радіоактивні дочірні продукти залишаються в хвостах переробки, потім їх стабілізують і повертають назад в рудник або хоронять якимось способом.

У деяких випадках через рудні тіла можна пропускати хімічні розчини і таким чином безпосередньо розчиняти уран. Даний процес називають видобутком підземним, або вилуговуванням. Крім того, в якості побічного продукту уран можна отримувати в процесах отримання деяких металів, наприклад міді чи золота, а також в якості побічного продукту при виробництві фосфорної кислоти з фосфоритів. Останнім часом масштаби застосування методу підземного вилуговування зростають.

За даними [4] для отримання 1 т збагаченого урану, який у вигляді ЯП завантажується у ЯР уранові рудники мають видобути 1800 м^3 (3600 т) руди.

Видобуту мінеральну сировину піддають збагаченню на гідрометалургійних заводах (ГМЗ). Після переробки уранової руди на ГМЗ виходить урановий концентрат у формі закису-окису природного урану ($\boldsymbol{U_3O_8}$). Урановий концентрат ($\boldsymbol{U_3O_8}$), одержуваний на заводах з переробки уранової руди, відомий під назвою жовтий кек і зазвичай містить 60–85% (ваг.) урану. Залежно від якості уранового концентрату, його іноді піддають додатковому очищенню перед відправкою в металевих контейнерах на конверсійний завод.

На конверсійний завод надходить урановий концентрат ($\boldsymbol{U_3O_8}$) у кількості 0,9 м^3 (7,3 т), якого вистачить в подальшому на виготовлення 1 т збагаченого урану, що міститься в в тепловиділяючих елементах (ТВЕЛ-ах) ЯП [4] Цей концентрат на конверсійному заводі перетворюється в гексафторид урану ($\boldsymbol{UF_6}$), який є найбільш придатною

формою для подальшого ізотопного збагачення. UF_6 сублімується (переходить з твердого стану в газоподібний, минаючи рідку фазу) при температурі 53 °С.

Збагачення урану – виробничий процес, у ході якого в урані підвищується концентрація подільного ізотопу ^{235}U. Природний уран містить два види ізотопів – ^{238}U, концентрація якого в природному урані становить понад 99%, і ^{235}U з концентрацією близько 0,711%. Більшість сучасних енергетичних реакторів працює на урановому паливі, в якому концентрація ізотопу ^{235}U становить від 3 до 5%.

У процесі збагачення концентрація ^{235}U доводиться до рівня, потрібного для певного типу реакторів. Збагачення урану здійснюється шляхом розділення ізотопів ^{235}U та ^{238}U. В результаті на виготовлення ЯП надходить збагачений та очищений уран у кількості 0,4 м^3 (1 тU) [4].

На даний час у світі експлуатуються в промисловому масштабі дві технології розділення ізотопів урану: газодифузійна та газоцентрифужна. Газоцентрифужний метод – розділення ізотопів урану за допомогою газових центрифуг – найбільш поширена технологія, що забезпечує значні технічні та економічні переваги, порівняно з енерговитратною газодифузною. Згідно з прогнозами Всесвітньої ядерної асоціації (ВЯА), газоцентрифужна технологія в майбутньому буде домінувати.

Виробництво ядерного палива

Збагачений по ізотопу ^{235}U гексафторид урану (UF_6) надходить на завод з виробництва ЯП для виготовлення порошку діоксину урану (UO_2), з якого, в свою чергу, виготовляються паливні таблетки для начинки ТВЕЛ-ів. ТВЕЛ-и формують тепловиділяючі збірки (ТВЗ) або касети.

ТВЗ є складовою частиною активної зони ЯР і призначені для генерування теплової енергії. Конструкція ТВЗ відрізняється для різних типів ЯР, але в загальному вигляді ТВЗ складається з несучої структури (каркасу), з однієї сторони якої розташована головка, з іншого – хвостовик, і включає в себе ТВЕЛ-и, зібрані в пучки. ТВЕЛ-и розташовуються в пучках з рівномірним кроком, який забезпечується дистанціонуючими решітками. ТВЕЛ являє собою герметичну тонкостінну трубу з цирконієвого сплаву з привареними на кінцях заглушками, споряджену циліндричними спеченими паливними пігулками із збагаченого діоксину урану.

Згідно з даними [4] з 1 т ЯП на АЕС буде вироблено 350 млн кВт×год електроенергії. АЕС з ЯР типу ВВЕР-1000 потужністю 1 млн кВт щорічно вироблятиме в середньому 7 млрд кВт×год електроенергії. Отже, для її роботи необхідно щорічно завантажувати у ЯР 20 т ЯП. Ця цифра підтверджується і іншими літературними джерелами.

В той же час з ЯР буде щорічно вивантажуватися ВЯП в тій же кількості (20 т). Вивантажене ВЯП протягом кількох років (час необхідний для розпаду короткоживучих радіонуклідів) знаходиться на АЕС в басейні витримки. Насамкінець, при замкненому ЯПЦ, тривалий час (до кількох років) займає процес регенерації ВЯП і виготовлення свіжого ЯП на відповідних підприємствах ЯПЦ.

Питання питомої енергоємності процесів видобутку і первинної переробки уранових руд включаючи переробку на збагачувальних фабриках та транспортування отриманої продукції розглянуто в [6]. За даними цього джерела питома енергоємність отримання окисиду урану становить в середньому 270 МВт·год/т (прямі затрати електроенергії).

Слід зауважити, що за одностайними висновками іноземних і вітчизняних фахівців питома енергоємність отримання концентрату руди для ЯП зростатиме через зниження концентрації корисних компонентів у рудах, збільшенням глибини відкритих і шахтних гірничих робіт. Для врахування цього фактору введемо коефіцієнт 1,15, і тоді пряма енергоємність первинної переробки (енергоємність отримання окису урану) зросте до 310 МВт·год.

Щодо непрямих витрат енергії при отриманні ядерних матеріалів ніяких даних немає. Непрямі витрати пов'язані з експлуатацією гірничо-видобувних комбінатів, збагачувальних фабрик, ГКЗ і включають: витрати на амортизацію споруд і обладнання, ремонтні роботи, витрати реагентів та матеріалів, заробітна плата, податки, прибутки та інші витрати. Їх розміри будемо оцінювати за вартістю ЯП на окремих стадіях його виробництва. У роботі [7] наведено дані щодо вартості ЯП на різних етапах його вироблення. Ці дані за станом 2017 р. відображено у табл. 1.

Разом з тим, виходячи з прогнозних даних щодо будівництва нових енергоблоків (див. частину 1 статті [1]), яке відбуватиметься в період 2025–2035 рр. (більш ранні терміни дуже малоймовірні), то початок експлуатації енергоблоків слід очікувати не раніше 2030 р. Спробуємо зробити оцінки на зміну вартості ЯП на цю дату.

Для цього розглянемо питання про його зміну за певний період. У табл. 1 наведені дані щодо вартості ЯП у 2012 та 2017 рр. за даними [7] і [8].

При порівнянні даних щодо ціни для двох років, наведених у табл. 1, можна зробити висновок про суттєве зниження вартості ЯП (практично вдвічі за 5 років – 2012–2017 рр.) та про значні зміни у його вартості на окремих стадіях виробництва. Ці зміни можна пояснити запровадженням більш ефективних технологій на виробництвах та зменшенням попиту на ЯП.

Таблиця 1 **– Структура вартості на 1 кг U у вигляді UO_2 ядерного палива за даними [7] та [8]**

Процес	Необхідна кількість	2012 р. за даними [8] [1)]			2017 р. за даними [7] [2)]		
		Ціна, $	Вартість, $	Частка, %	Ціна, $	Вартість, $	Частка, %
Природний уран	8,9 кг U_3O_8	146	1300	46,9	68	605	43
Конверсія	7,5 кгU в UF_6	13	98	3,5	14	105	8
Збагачення	7,3 ЕРР	155	1132	40,9	52	380	27
Виробництво ЯП	за кг	240	240	8,7	300	300	22
Всього			**2770**	**100**		**1390**	**100**

[1)] Ціни приблизні станом на березень 2012 р.

[2)] Ціни приблизні станом на березень 2017 р.

Примітка. При вигорянні 45 ГВт/т виробляється 360 тис. кВт×год електроенергії, а тому паливна складова електроенергії складала у 2012 р. 0,78 ¢/(кВт×год), а у 2017 – 0,39 ¢/(кВт×год).

Чи буде зменшуватися ця вартість у майбутні періоди спрогнозувати важко. Але є певна вірогідність, що ціни у період 2030–2070 рр. все-таки будуть зростати. Тому у розрахунках цієї статті прийнята гіпотеза про зростання цін на ЯП у період 2030–2070 рр. на 2% щорічно.

Початкові ціни у 2030 р. приймаємо за даними табл. 1 за станом 2017 р. При цьому внесемо певну корекцію у вартість природного урану (перший рядок табл. 1) стосовно вартості уранового концентрату, оскільки його ціна для українських виробництв у 2017 р. за даними [9] була на рівні 105 $/кг, тобто вищою за світову (68 $/кг). У зв'язку з цим виникає запитання: Чи не вигідніше купувати концентрат на світовому ринку? Відповідь на це питання залежатиме від того, яким чином отримано значення 105 $/кг. Якщо за курсом долара, встановленим Національним банком України (НБУ) – k_{NBU} =27 ₴/$ на час написання статті [9], то вартість концентрату складала 2835 ₴/кг. Така ціна підтверджується інформацією [10], у якій сказано (мовою оригіналу) «Выручка ВостГОКа по итогам 2015 года возросла в 2,1 раза – до 2,84 млрд грн». При цьому в цій же інформації сказано, що обсяги продукції склали величину в 1 тис. т. Т.ч., ціна цієї продукції 2840 ₴.

У частині 1 цієї статті [1] було показано, що розрахунки доцільно вести за курсом, який визначається паритетом купівельної спроможності долара США (ПКС) – k_{PKS}, значення якого за станом 2015 р. становило 4,8 ₴/$ (при прирості 4% на рік, порівняно з 2014 р. (див. таблицю статті [1])). Отже, ціна концентрату складе у 2015 р. за курсом ПКС 592 $, що абсолютно нереально. Приймаючи значення ціни концентрату 105 $/кг, реальна його ціна в гривнях має бути на ріні 546 ₴/кг (при значенні k_{PKS} =5,2 ₴/$ у 2018 році).

У цьому випадку змінюється загальна початкова ціна ЯП та відносний розподіл вартості за стадіями виробництва, що відображено у табл. 2. В цій же таблиці наведена середня прогнозна вартість ЯП у період 2030–2070 рр. та середні ціни за стадіями виробництва.

З даних табл. 1 та 2 випливає, що для вироблення в Україні 90 млрд кВт×год електроенергії на АЕС потрібно ~ 2300 т уранового концентрату U_3O_8 на рік. За даними [9] в Україні за станом 2017 р. вироблялося близько 1000 т уранового концентрату, що становить 43,5% потреби. Десять років тому було прийнято програму «Ядерне паливо України» з планами наростити видобуток уранового концентрату до 1880 т на рік, будівництва заводу з виробництва ЯП плюс випуску 270 т на рік цирконієвого прокату.

Разом з тим, в розрахунках цієї статті прийнято, що видобуток уранової руди та її первинна пе-

Таблиця 2 **– Структура середньої вартості на 1 кг U у вигляді UO_2 ядерного палива на прогнозований період 2030–2070 рр.**

Процес	Необхідна кількість х ціну*)	Вартість, $			Частка, %
		2030 р.	2070 р.	Середня	
Природний уран	8,9 кг U_3O_8 *x* 105 $	935	2065	1500	54,4
Конверсія	7,5 кгU в UF_6 x $14	105	232	169	6,1
Збагачення	7,3 ЕРР x $52	380	839	610	22,1
Виробництво ЯП	за кг	300	663	482	17,4
Всього		**1720**	**3799**	**2761**	**100**

*) Середні початкові прогнозні ціни за станом на 2030 р.

реробка відбуватиметься в Україні на українських підприємствах на 100%.

Перероблення уранових руд з вмістом природного урану до 0,15% і отримання уранового концентрату (U_3O_8) здійснюють на гідрометалургійному заводі у м. Жовті Води (Дніпропетровська обл.). Основною продукцією заводу є концентрат природного урану чистотою 99,85% (94% UO_2 + 6% UO_3), що становить до 76% від загального обсягу продукції. Крім того, Україна має унікальні родовища цирконію (Малишевське родовище титано-цирконієвої руди). Цирконій є унікальним матеріалом для атомної енергетики і його використовують для виготовлення ТВЕЛ-ів і ТВЗ. ДП «Вільногірський державний гірничо-металургійний комбінат» є сьогодні фактично монопольним постачальником цирконієвої сировини на світові ринки [11].

Процеси конверсії, збагачення та виробництва ЯП потребують відповідних підприємств, які на сьогодні в Україні відсутні. За даними [12], за станом 2017 р. 100% ЯП українські АЕС отримують по імпорту (приблизно по 50% від російського холдингу ПО "ТВЭЛ" та американської компанії Westinghouse).

Вимоги диверсифікації джерел постачання передбачають отримання енергоресурсу з одного джерела обсягом не більше третини потреби. І, оскільки, як це було показано в частині 1 цієї статті [1], енергетичні витрати на імпортні складові значно більші, ніж власного вироблення, особливо за варіантом незмінності політики НБУ щодо курсу валют, в розрахунках приймаємо гіпотезу про те, що 33% ЯП за межами 2030 р. будуть українського походження, а 66% – імпорт як мінімум з двох різних джерел по 33%. При цьому процеси конверсії та збагачення уранового концентрату відбуватимуться на іноземних підприємствах, тобто ця продукція буде надходити в Україні по імпорту повністю, оскільки поява таких виробництв в Україні малоймовірна.

За даними закордонних джерел [13], лише збагачення газових сполук урану на сучасних газових центрифугах (найбільш розповсюджений засіб збагачення) від концентрацій, які досягнуто в процесі первинної переробки уранової руди (0,7% ^{235}U) до концентрацій необхідних для створення ТВЕЛ-ів із концентрацією в 3–4% ^{235}U, які необхідні для роботи АЕС з енергоблоками ВВЕР-1000 прямі витрати електроенергії становлять 62 МВт·год/т (0,28 ГДж/кг).

Енергоємність імпортних складових ядерного палива

Виходячи з вищенаведеного, вартість імпортних компонентів ЯП за середніми значеннями складатимуть величину ~ 935 $/кг UO_2, або ~ 34% від загальної вартості ЯП. 66% вартості ЯП буде українського походження. Сподіватися на збільшення цієї частки на період до 2070 р. не варто.

Енерговитрати на імпортні складові ЯП будемо розраховувати за формулою:

$$e_{imp1} = 29{,}3 \cdot 10^6 \cdot e_{vvp} \cdot K_{p_US\$} \cdot k, \text{ ГДж/кг},$$

де e_{vvp} – енергоємність ВВП, кг у.п/₴; $K_{p_US\$}$ – вартість імпортних складових ЯП, $/кг; k – курс валюти, ₴/$.

Отже, при темпах зниження енергоємності ВВП 3,8% (див. [1]) у 2035 р. його значення буде на рівні 0,14 кг н.е./$ (ПКС). Слід очікувати що за 2035 р. темпи зниження енергоємності ВВП України знизяться. Приймемо, що це зниження у період 2035-2070 рр. буде в середньому на рівні 1,5% на рік. Т.ч., у 2070 р. e_{vvp} = 0,082 кг н.е./$ (ПКС). Середнє значення за період 2035–2070 рр. – 0,111 кг н.е./$ (ПКС).

В частині 1 статті були обґрунтовані темпи приросту значень ПКС у період 2014—2035 рр. на рівні 5% на рік і було відзначено, що спостерігається зниження темпів цього приросту. Тому на період 2035—2070 рр. приймаємо середнє значення приросту значень ПКС на рівні 2,5% на рік. І тоді середнє значення ПКС за цей період буде на рівні ~21 ₴/$.

З урахуванням вищенаведеного середня енергоємність ВВП України в період 2035–2070 рр. буде такою:

$$e_{vvp} = 0{,}111 \cdot 10 / 7 / 21 = 0{,}0076 \text{ кг у.п/₴}.$$

Щодо значення k_{NBU} за період 2035–2070 рр. – приймаємо для розрахунку, що середня річна інфляція за цей період знизиться до рівня 2%. Т.ч., середнє значення за зазначений період буде на рівні k_{NBU} = 105 ₴/$.

При цьому питомі повні енергетичні витрати на ЯП, яке отримуватиметься по імпорту, будуть:

– за варіантом а – при курсі долара США k_{NBU} =105 ₴/$ – незмінність політики НБУ України і інфляції гривні в період 2035–2070 рр. 2% на рік:

$$e_{imp1} = 29{,}3 \cdot 10^6 \cdot e_{vvp} \cdot K_{p_US\$} \cdot k_{NBU} =$$

$$= 29{,}3 \cdot 10^6 \cdot 0{,}0076 \cdot 935 \cdot 105 = 21{,}9 \text{ ГДж/кг};$$

– за варіантом б – при курсі долара США k_{PKS}= 21 ₴/$ – за прогнозним значення ПКС:

$$e_{imp1} = 29{,}3 \cdot 10^6 \cdot e_{vvp} \cdot K_{p_US\$} \cdot k_{NBU} =$$

$$= 29{,}3 \cdot 10^6 \cdot 0{,}0076 \cdot 935 \cdot 21 = 4{,}4 \text{ ГДж/кг}.$$

Виходячи з отриманих даних повні енергетичні витрати на ЯП для енергоблоку ВВЕР-1000, яке буде отримуватися по імпорту за 40 років експлуатації, будуть такими:

– за варіантом а:

$$E_{imp1-a} = 21{,}9 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0{,}34 \cdot 40 = 5{,}96 \text{ ПДж};$$

за варіантом б:

$$E_{imp1-b} = 4{,}4 \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 0{,}34 \cdot 40 = 1{,}2 \text{ ПДж}.$$

Енергоємність компонентів палива вітчизняного виробництва

Приймаючи, що прямі енергетичні витрати на природний уран становлять 40% від повних, тобто від 310 МВт·год/т (що потребує подальшого уточнення), з урахуванням енергоємності електроенергії за даними [2], яка визначена на рівні 4,5 МДж/(кВт·год), отримуємо орієнтовне значення повних витрат енергії на отримання концентрату руди для ЯП:

$$e_{p.U} = 4{,}5 \cdot 10^6 \cdot 310 / 0{,}4 = 3{,}5 \text{ ГДж/кг}.$$

Виходячи з даних табл. 2, вартість етапу виробництва ЯП складає 17,4% від його повної ціни, з яких лише 33% (за гіпотезою) будуть отримуватися на українських підприємствах, що складатиме 5,7% повної вартості, або ~7,8% від вартості природного урану. Т.ч., повні питомі енергетичні витрати на виробництво ЯП в Україні будуть:

$$e_{p.vyr} = 0{,}078 \cdot 3{,}5 = 0{,}273 \text{ ГДж/кг}.$$

Враховуючи те, що проектний термін експлуатації енергоблоку гіпотетично складатиме 40 років, у припущенні, що питома енергоємність процесів створення ТВЕЛ-ів (отримання цирконію та інших супутніх матеріалів необхідної чистоти, енерговитрат пов'язаних з кількарічним перебуванням ТВЕЛ-ів в басейні витримки на АЕС тощо, а також їх транспортуванням до АЕС) введемо коефіцієнт 2 до раніше визначеної енергоємності як українського ЯП, так і імпортного (лише щодо останньої стадії – виробництво ЯП).

І тоді, сумарні витрати енергії на ЯП для енергоблоку ВВЕР-1000 складуть величину:

– за варіантом а:

$$E_{p.bl} = (3{,}5 + 2 \cdot 0{,}273) \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 40 + \\ + (1 + 2 \cdot \frac{482 \cdot 0{,}66}{935}) \cdot 21{,}9 \cdot 10^{15} = 39{,}6 \text{ ПДж};$$

– за варіантом б:

$$E_{p.bl} = (3{,}5 + 2 \cdot 0{,}273) \cdot 10^9 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 40 + \\ + (1 + 2 \cdot \frac{482 \cdot 0{,}66}{935}) \cdot 4{,}4 \cdot 10^{15} = 10{,}2 \text{ ПДж}.$$

Висновки до частини 2 статті

1. Визначено показники повної енергоємність ядерного палива, необхідного для роботи енергоблоку АЕС з реакторами ВВЕР-1000, а саме:

– сумарні витрати енергії на ЯП для енергоблоку АЕС з реакторами ВВЕР-1000 протягом 40 років експлуатації за варіантом незмінності політики НБУ України в обсязі 39,6 ПДж;

– ті ж витрати при курсі гривні за значенням паритету купівельної спроможності долара США у обсязі 10,2 ПДж.

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

1. Білодід В.Д. Визначення ефективності вироблення електричної енергії атомними електростанціями за методологією повних енергетичних витрат. Частина 1. Витрати енергії на будівництво. *Проблеми загальної енергетики*. 2018. № 2(53). С. 36—44. https://doi.org/10.15407/pge2018.02.036)

2. 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.

3. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. Уч. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1984. 280 с.

4. Экономика ядерного топливного цикла / Перевод отчёта МЕА «The Economics of the Nuclear Fuel Cycle / Les Aspectes Economiques du Cycle du Combustible Nuclearie. Copyright OECD 1994». М.: Информ-Атом, 1998. 141 с.

5. Uranium 2016: Resources, Production and Demand. A Joint Report by the Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency. OECD 2016 NEA No. 7301. 550 p. URL: www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf (24.07.2018).

6. Тангаев И.А. Энергоёмкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. М.: Недра, 1986. 231 с.

7. World Nuclear Association. Economics of Nuclear Power. URL: www.world-nuclear.org/information-library/.../economics-of-nuclear-power.aspx .

8. Investirovanije v Uran_5-5. indd. 7/3/2013. URL : http://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2012/system-effects-exec-sum.pdf .

9. Маскалевич І. Уран проміжного поділу. *Дзеркало тижня*. 2018. Вип. № 24—25. 23 червня–6 липня.

10. Минэнергоугля прогнозирует рост производства уранового концентрата в 2017 году на 22%. URL: https://biz.censor.net.ua/news/3021519/minenergouglya_prognoziruet_rost_proizvodstva_uranovogo_kontsentrata_v_2017_godu_na_22.

11. Тарнавський А.Б. Сучасні перспективи створення ядерно-паливного циклу в Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2013. Том 23. №15. С. 133—141.

12. Enriched uranium. URL: http://en.academic.ru/dic.nsf/enwiki/23491.

13. Маскалевич І. Атомна передісто(е)рія. *Дзеркало тижня*. 2018. Вип. № 28. 21 липня–10 серпня.

Надійшла до редколегії: 30.08.2018