

ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА В СИСТЕМАХ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ МІСТ УКРАЇНИ

І.М. Карп^{*}, академік НАН України, **Є.Є. Нікітін**^{**}, докт. техн. наук, **К.Є. П'яних**^{***}, докт. техн. наук
Інститут газу НАН України,
вул. Дегтярівська, 39, Київ, 03113, Україна,
e-mail: karpkiev@gmail.com; nikitin_ee@ukr.net; pyanykh67@gmail.com

В містах проживає 70% населення України. Забезпечення міст із щільною забудовою електричною енергією здійснюється в основному від централізованих джерел генерації: ТЕС, ТЕЦ, АЕС, ВДЕ, а тепловою – від ТЕЦ та газових котелень. Проаналізовані можливості енергетичного самозабезпечення міст України на основі використання альтернативних та місцевих джерел енергії. У енергозабезпеченні міст спостерігається світова тенденція збільшення частки ВДЕ, особливо у містах та районах із котеджною забудовою. Забезпечення міст власними енергоресурсами може бути досягнуто за умови комплексного використання відновлюваних та місцевих джерел. Виробництво електричної енергії відновлюваними джерелами по показниках повернення інвестицій EROI та нормованої вартості енергії за життєвий цикл джерела генерації LCOE наближається до показників для традиційних джерел. Наведено приклади використання ВДЕ задля забезпечення енергетичних потреб будинків та поселень в Європі. Висока вартість енергії з ВДЕ стримує розвиток цього напрямку в Україні. Ефективність використання відновлюваних та місцевих джерел у будівлях досягається тільки з одночасним запровадженням енергозберігаючих заходів – утепленням будинків, впровадженням систем контролю енерговитрат. Бібл. 14.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергетичне самозабезпечення міст, теплові насоси, когенерація.

В Україні в містах проживає біля 70% населення країни.. Постачання електричної та теплової енергії в містах із щільною забудовою відбувається майже цілком від централізованих генеруючих джерел – ТЕС, ТЕЦ, АЕС, районних котелень та відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У містах з переважно котеджною забудовою або подібних районах міст значну частку у енергопостачанні в останні роки починають становити ВДЕ. Актуальною постає концепція енергетичного самозабезпечення міст, яка полягає в тому, що місто є не тільки споживачем енергії, але генерує її з використанням відновлюваних джерел і місцевих енергетичних ресурсів. До ВДЕ відносяться енергія сонячного випромінювання, енергія вітру, гідравлічна енергія малих річок, геотермальна енергія, біологічна сировина. До місцевих ресурсів відносяться тверді побутові відходи, стоки, осади міських каналізаційних стоків (у комбінації з використанням сонячної енергії), відходи промислових підприємств, рослинні відходи, водоймища, у т.ч. Чорне та Азовське моря. У зв'язку із суттєвим зростанням як централізованого так і автономного виробництва енергії з відновлюваних джерел (ВД) актуальним стає питання щодо їхнього використання у енергозабезпеченні міст.

Мета роботи полягає у спробі оцінити можливість та техніко-економічну доцільність енергетичного самозабезпечення міст України за рахунок ВДЕ і місцевих енергетичних ресурсів.

Оцінка можливості виробництва та використання ВДЕ в містах із щільною забудовою від централізованих джерел залежить від наявності відповідного ресурсу або їхньої сукупності, економічних умов – можливостей інвестування у обладнання та інфраструктуру, прийняття політичних рішень керівними органами держави, готовності фінансової підтримки з боку держави виробництва енергії відновлюваними джерелами, яке здійснюється, в основному, шляхом встановлення спеціальних тарифів на електричну та теплову енергію. В європейських країнах

помірного клімату така підтримка має місце практично повсюди. Досвід показує, що на сучасному технологічному рівні виробництва енергії ВД це призводить до підвищення її вартості. Необхідно зауважити, що збільшення обсягів виробництва енергії з ВД викликає необхідність прийняття заходів задля стабілізації параметрів електричних мереж шляхом акумуляції енергії і створення так званих інтелектуальних мереж, які виконують цю функцію [1]. В енергосистемі України встановлені маневрові потужності використовуються ГЕС, ГАЕС, чого недостатньо, тому як вимушений балансує захід використовується ТЕС. У разі збільшення виробництва електроенергії ВД з'являється необхідність тимчасового зменшення виробництва енергії ТЕС або АЕС, а також її акумуляції, особливо в періоди максимального виробництва ВД. Сценарії управління енергосистемою для випадків змін у обсягах генерації розробляються керуючою компанією Укренерго [2]. Один з вірогідних сценаріїв передбачає необхідність включення в енергосистему 2 ГВт маневрових газових потужностей.

В Україні виробництво електричної енергії всіма ВД у 2019 році становило 5,4 млрд. кВт*г або 3,6% від загального її виробництва. Розвиток виробництва енергії ВД в Україні невідворотній. Це обумовлено необхідністю зменшення залежності від імпорту первинних енергоресурсів, зобов'язаннями України як члена Європейського енергетичного співтовариства щодо зменшення шкідливих викидів, стрімким зменшенням вартості встановлених потужностей ВДЕ, усвідомленням вичерпаності викопних палив. Урядом України оприлюднена «Концепція «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року», яка передбачає виробництво 70% електроенергії з ВДЕ, з них 15% – за рахунок дахових СЕС, тобто в містах, а 20-25% покривати за рахунок атомних станцій та підвищення енергоефективності. Передбачається також створення системи накопичування енергії та будівництво газових маневрових станцій. Реалізація Концепції вимагає щорічних інвестицій в енергетику \$10 млрд., з них 2-3 млрд. державних інвестицій, решта – за рахунок власних та зовнішніх інвестицій та міжнародної допомоги, що мало вірогідно. Так само ідеалістично виглядають два сценарія енергетичного переходу України на переважне або повне виробництво енергії з ВДЕ, розроблені фінською компанією Вяртсила. Сценарії передбачають рівень виробництва енергії ВД 88 та 100% та доведення встановлених потужностей ВДЕ до 124 ГВт, тобто збільшення у 15 разів.

У зв'язку із швидким нарощуванням потужностей ВДЕ у світі виникає питання щодо порівняної ефективності виробництва енергії з ВДЕ та з традиційних джерел на викопних паливах та чи зможе «зелена» енергетика замінити традиційну, беручи до уваги зростання загальносвітового споживання електроенергії. Аналіз статистичних даних, наведених у огляді [3], показує, що обсяги виробництва енергії нарощують ядерний, газовий і навіть нафтовий сектори, майже зберігає рівень виробництва вугільний сектор, особливо швидко нарощувалось виробництво енергії з ВД. Так, загальне світове виробництво енергоресурсів виросло з 2013 до 2019 року на 8,9% – до 13838 млн. т нафтового еквіваленту, у тому числі на газовому паливі на 15% – до 3326 млн., виробництво АЕС – на 8,3% – до 611 млн., вугілля – скоротилося на 1,5% – до 3917 млн., ВДЕ – виросло у 2,13 рази – до 561 млн. т н.е. Незважаючи на те, що вартість 1 кВт*г виробленої ВДЕ часто менша вартості енергії з традиційних джерел, частка електроенергії, що виробляється на вугіллі, становить в цілому у світі близько 30% [4].

Задля коректного порівняння вартості енергії, отриманої різними способами, використовується показник EROI (energy returned on investment) – відношення отриманої з джерела енергії до витраченої на її виробництво. EROI залежить від технологій видобутку палива, його розвіданих запасів, цін на обладнання та саме паливо. Теоретично EROI повинен бути більше одиниці, практично за значення EROI 4:1 використання даного виду палива буде нерентабельним і потребуватиме субсидування. EROI трохи більше одиниці припустимий тільки для видобувних компаній.

EROI для вугільних електростанцій у США надзвичайно високий – у 2010 році він становив 80:1. Для порівняння: значення цього коефіцієнту 100:1 на цей час характерні для гідроелектростанцій. EROI для вугільних електростанцій у Європі 30:1. Рекордсменом по обсягах споживання вугілля у Європі є Німеччина, незважаючи на те, що у 2018 році обсяг виробництва «зеленої» енергії у країні перевищив обсяги її виробництва з викопних палив. Зараз в Німеччині налічується 84 вугільних ТЕС, які вимушені згладжувати відмову від атомної генерації. EROI для вугільних ТЕС України орієнтовно становить 3,4:1. Щодо «зеленої» енергетики, то найвищий EROI – 16:1 сьогодні показують німецькі вітрові офшорні комплекси, але галузь перебуває у стагнації. Темпи будівництва нових ВЕС впали на 80%, а обсяги будівництва у 26 разів менше річного приросту, необхідного задля заміщення виробництва енергії з викопних палив.

Іншим загальноприйнятим показником порівняльної оцінки вартості енергії є показник LCOE (levelized costs of energy) – вирівняна (нормована) вартість енергії за весь життєвий цикл джерела генерації. За результатами щорічного аналізу рівня затрат на енергоресурс, виконаного авторитетною нідерландською компанією Lazard [5], нові покоління СЕС та офшорні ВЕС досягли та продовжують підтримувати конкурентоспроможність із традиційними засобами генерації. Вартість енергії від деяких технологій ВДЕ наближається до вартості енергії від звичайних джерел, \$/МВт·г: ВЕС на суходолі – 28-54; ВЕС на суходолі з урахуванням дотацій – 11-45; СЕС на тонких плівках – 32-42; вугілля – 26-41; АЕС – 27-31. Для вугільних ТЕС та АЕС показник визначено з урахуванням декомпозиції станцій та упорядкування територій. Найбільше значення LCOE серед ВДЕ – 151-242 \$/МВт·г – мають сонячні дахові фотоелектричні перетворювачі на приватних будівлях. Серед традиційних джерел найменшу вартість енергії мають газові генератори комбінованого циклу – 44-68 \$/МВт·г, найбільшу – пікові газові установки – 150-199 \$/МВт·г. Таким чином, середні значення LCOE для ВДЕ ще поступаються значенням цих показників для традиційних джерел генерації. Можливо, саме внаслідок цього у світі продовжує будуватись велика кількість вугільних електростанцій загальним числом до 1000, в основному у країнах Південно-Східної Азії та Африки.

Виробництво енергії з ВД стимулюється державою і в Україні. Законом України «Про альтернативні джерела енергії» встановлено «зелений» тариф задля стимулювання виробництва електро- та теплової енергії з альтернативних джерел:

- для суб'єктів господарювання на електричну енергію, вироблену з енергії сонця, вітру, біомаси, біогазу;
- гідроенергії та геотермальної енергії;
- окремо для приватних домогосподарств на електричну енергію, вироблену з енергії сонця та вітру потужністю енергоустановок до 30 кВт.

Передбачено отримання надбавки до «зеленого» тарифу в розмірі 5 та 10% за використання обладнання українського виробництва на рівні 30 та 50 %. Тарифи на «зелену» енергію в Україні встановлено до 2030 року і прив'язано до курсу євро. В середньому вони у 4,5 рази вищі, ніж для традиційної енергетики. Це пояснює, з одного боку, привабливість інвестицій в Україні у виробництво енергії з ВД, з другого – необхідність стриманого її виробництва у відповідності до економічних можливостей бюджету та населення.

Основною рушійною силою зростання виробництва енергії з ВДЕ є нібито запобігання змінам клімату на Землі в бік глобального потепління, основною причиною якого значна частина вчених вважає наявність в атмосфері CO₂ антропогенного походження, що екранує випромінювання Землі. Інша частина вчених, не заперечуючи цих змін, вважає причиною явища планетарного масштабу: прецесію земної вісі, періодичні зміни сонячної активності, неконтрольовану часту зміну напрямку руху атмосфери з переважно широтного із заходу на схід до меридіонального. Зазначимо, що у США така думка превалює, що підтверджується виходом країни з Паризької угоди по клімату. Така точка зору прийнята і у NASA.

Виходячи із застережень щодо змін клімату, цілий ряд міст і навіть держав і великих регіонів оголосили себе територіями так званої безвуглецевої енергетики, в основі якої лежить використання ВДЕ. Вже більше 40 міст у всьому світі повністю перейшли на відновлювану енергію [6]. Ще приблизно 100 міст оголосило щодо намірів переходу на ВДЕ на 70%. У США на «зелену» енергетику у повному обсязі перейшов Берлінгтон, близькі до цього Атланта та Сан-Дієго. На 70% на чисту енергетику перейшли Сіетл, Юджин та Аспен. Очікується, що у 2020 році у Каліфорнії половина енергії буде вироблятися з ВД. З цією метою у великих містах застосовується практика виділення субсидій для підприємств, готових до відмови від викопного палива, а також фінансове стимулювання підприємств, які обладнують свої нові об'єкти сонячними панелями. За прогнозами Каліфорнійського технологічного інституту та Інституту Карнегі у США 80% потреби у енергії можуть забезпечити ВД. Підкреслюється, що для досягнення 100% результату необхідні системи акумуляції, здатні нівелювати провали виробництва енергії у похмуру та безвітряну погоду. Подібні приклади є і в Європі.

Район Вобан – центр програми сталого розвитку Фрайбурга (Німеччина) – демонструє 100% забезпечення енергією від ВД. Нідерландська компанія Vattenfall будує біля містечка Haringvliet гібридний енергетичний парк, який складається з сонячних панелей, вітряних турбін та акумуляторних батарей [7]. Встановлена потужність генерації становить 60 МВт, що достатньо для забезпечення 40 тис. домогосподарств. Вартість енергопарку \$40 млн. (\$670 на 1кВт встановленої

потужності), термін введення в дію – вересень 2020. Вітряки мають висоту 150 м; їхня загальна потужність 22 МВт. Потужність 124-х сонячних панелей – 38 МВт. Ємність батарей виробництва компанії BMW – 12 МВт·г; батареї розміщені у 12 морських контейнерах. Цілком енергетичні потреби за рахунок ВДЕ забезпечує шведське місто Векше населенням 90 тис. осіб. Місто визнане Єврокомісією найзеленішим містом Європи. Велику частку у ВДЕ складає біомаса і біогаз [8]. Всі міські автобуси працюють на біогазі, який отримують ферментацією харчових відходів і стічних вод. Тепло, гаряча вода та електроенергія надходить з котелень та ТЕЦ, які спалюють біомасу. У ряді країн (Німеччина, Іспанія, Швеція, Данія) розроблені сценарії повного переходу на ВДЕ. Шведське енергетичне агентство Energimyndigheten опублікувало доповідь, у якій сповіщається щодо п'яти сценаріїв розвитку енергетики. У всіх сценаріях біля 40% виробництва електроенергії відводиться гідроенергетиці, значна частка припадає на вітроенергетику. Передбачається до 2040 року виключення виробництва енергії атомними електростанціями, які сьогодні виробляють 37,5% енергії, а також зростання розподіленої сонячної генерації та її інтеграція у всі нові забудови. Можна припустити реальність деяких сценаріїв, беручи до уваги суттєві обсяги виробництва енергії гідроелектростанціями, чого немає у інших названих вище країнах. Сценарій з когенерацією передбачає широке використання біоенергетичних потужностей. Інститутом відновлюваної енергетики НАН України представлено інформацію щодо іноземного досвіду перетворення та акумулювання енергії відновлювальних джерел задля забезпечення споруд громадського призначення. Інформація почерпнута з сайту Всесвітньої ради з екологічного будівництва <http://www.worldgbc.org> та інших сайтів профільних установ: www.communities.gov.uk; <http://www.creedla.com>; <https://www.architectsjournal.co.uk>; <http://www.acarchitects.biz/guide-to-building-a-low-energyhome-1>; Toronto Atmospheric Fund, 2015-2017; <http://www.passiv.de>. В цих матеріалах повідомляється, що з 2021 року країни Європейського союзу планують перейти на зведення енергоефективних, екологічно чистих будинків, здатних завдяки ВД виробляти енергії більше, ніж споживати. Буде створено систему перетворення та акумулювання енергії ВДЕ задля забезпечення споруд громадського призначення. Досягати нульового енергоспоживання таким будинкам дозволяє не лише ефективне використання відновлюваних природних джерел енергії, а й застосування енергозберігаючих технологій, наприклад, якісна теплоізоляція та акумуляція теплової енергії. На випадок виникнення перебоїв з власною енергією активні будівлі у резервному порядку підключаються до акумуляторів енергії або загальної мережі, а потім повертають позичений ресурс назад з надлишком. На основі екологічно чистих будинків будуть будуватися екологічно чисті поселення. Додатково облаштовується система інженерних споруд і комунікацій, яка забезпечує споживання або розподіл електричної і теплової енергії, переробку відходів з виробництвом біогазу або біопалива, комплексне використання геотермальної енергії, акумулювання «зайвої» енергії та інше. Інформаційне забезпечення світового проекту під назвою «Просування чистого нуля» здійснює Всесвітня рада з екологічного будівництва, яка об'єднує регіональні організації з екологічного будівництва в 70 країнах світу. Рада є міжнародною незалежною некомерційною організацією, яка складається з підприємств та організацій, що працюють у будівельній галузі (<http://www.worldgbc.org>). Проект започатковано у 2016 році і вже отримав узгодження у 15 регіональних радах з екологічного будівництва. Він передбачає до 2050 року створення 100% екологічно чистого будівництва. Лідером у впровадженні енергоефективних та екологічно чистих будинків є країни Європейського союзу, зокрема Великобританія. Так у Великобританії в квітні 2007 року був введений Кодекс екологічно чистих будинків (далі Кодекс) як національний стандарт з метою поліпшення загальної екологічності нових будинків шляхом встановлення єдиної системи умов, в межах якої будівельна індустрія може спроектувати і будувати будинки за високими екологічними стандартами. Кодекс також дає покупцям житла інформацію щодо впливу їхнього нового будинку на екологію та потенційні експлуатаційні витрати на цей будинок. У наведених вище сайтах подано приклади як проектів, так і вже збудованих енергоефективних та екологічно чистих будинків. Одним з прикладів є будівництво екопоселення «Hanham Hall» в Південному Глостерширі, розташованого на площі 6,6 га біля Бристоля. Особливістю поселення є система когенерації тепла і енергії (CHP system) з використанням біомаси (<https://www.architectsjournal.co.uk>). Організацією у Великобританії, що сприяє будівництву будинків з «net-zero» рівнем викидів вуглецю, є Zero Carbon Hub. Нею розроблено універсальну схему екологічно чистого будинку, головною особливістю якого є енергоефективний сонячний дизайн. Будинки проектуються з великими вікнами на південну сторону і маленькими вікнами на

підвищеннях з північного боку. Ще одна загальна особливість – ретельно ізольовані стіни і дахи з повітронепроникною конструкцією (<http://www.acarchitects.biz/guide-tobuilding-a-low-energy-home-1>).

В Канаді спроектовано енергоефективний будинок з використанням геотермальної енергії поверхневих шарів ґрунту (*Toronto Atmospheric Fund, 2015-2017*).

Слід підкреслити, що у наведених прикладах проекти та збудовані поселення відносяться до індивідуальних будівель і не містять інформації щодо багатопверхівок, ні тих, що вже існують, ні тих, що проєктуються. Крім того наведена інформація не містить економічних оцінок, що не дає можливості розглядати використання існуючого досвіду в умовах щільної забудови у містах України.

Ближчим до умов міст України із щільною забудовою є приклад естонського міста Тарту, яке прагне до статусу «розумного» міста (Smart City) [9]. Обов'язковою умовою статусу є висока енергоефективність будівель. Завданням проєкту, який має назву SmartEnCity, є перетворення тартуських «хрущовок», збудованих ще у 60-ті роки, у енергоефективні «розумні» будинки. Проєкт частково фінансується з фондів ЄС. Він включає повне оновлення фасадів, обладнання їх сонячними панелями, оснащення квартир «системами розумного будинку», які дають змогу мешканцям контролювати та регулювати витрату енергії. До 2018 р. було переобладнано 3 будинки з 20, а всього їх у країні 6000. Керівники проєкту очікують, що середньомісячний на протязі року рівень споживання енергії у будинках зменшиться з 270 до 90 кВт·г/кв. метр. Мешканці переобладнаних помешкань констатують, що у 2019 році споживання теплової енергії зменшилося на 50%, а газу – на 80%. Крім того, встановлені на будинку сонячні панелі виробили утричі більше електроенергії, ніж витратили. Проєкт піддавався критиці внаслідок його високої вартості. Ремонт кожного багатоквартирного будинку обходиться в середньому у 1 млн. євро. ЄС покриває половину витрат, а для оплати іншої половини мешканці беруть кредити. Кожна родина тепер платить за реновацію 100 євро на місяць. Виникає риторичне питання: чи можлива така ситуація в Україні, враховуючи існуючий рівень життя. Між тим сповіщається, що проєктом зацікавились у інших містах республіки, а також у Латвії, Польщі і Болгарії, де збереглося багато жилих будинків радянської епохи. З наведеної інформації видно, що основний позитивний ефект реконструкції «хрущовок» полягає у термомодернізації будинків. Вона дає змогу констатувати, що ні одна з технологій виробництва енергії ВД не забезпечує задоволення енергетичних потреб без одночасного запровадження енергозберігаючих заходів, насамперед утеплення огорожуючих конструкцій, а також контролю та регулювання витрат, рекуперації теплоти, реконструкції систем водопостачання. Частково пряме використання сонячного випромінювання в Україні для виробництва енергії у будівлях щільної забудови можливе на основі відомих в цей час винаходів, але наявні розробки ще не знайшли масового використання внаслідок порівняно високої вартості. Серед цих розробок зазначимо сонячну плівку, черепицю та сонячні жалюзі. Найбільш привабливими виглядають сонячні панелі на основі поліетиленової плівки – PЕТ-плівки. Панелі розроблені в Австралії; їх виробляють шляхом друку спеціальних електронних чорнил на прозорий пластиковий лист товщиною менше 0,1 мм (*building-tech. 25.07.2019*). Панелі можна гнути і кріпити до поверхні любої кривизни. Незаперечною перевагою плівок є їхня вартість – \$7,42/ м², що у 30 разів дешевше панелей на жорстких кремнієвих пластинах від Тесла (\$235/ м²). Додатковою перевагою є те, що вони можуть працювати навіть при слабому освітленні, завдяки чому їх можна розміщувати у сутінку або орієнтувати не на сонячну сторону. Щодо ККД та питомої потужності не повідомляється. Компанія Tesla розробила сонячну черепицю Tesla Solar Roof замість звичайної покрівлі [10]. В основі Solar Roof прийнята склокераміка, виробництво якої давно налагоджене. Всередині матеріалу знаходиться спеціальне покриття, яке перетворює енергію сонячного випромінювання у електричну. Задля перетворення енергії використовується домашній генератор Powerwall, який пропонується в комплекті з покрівлею. Перевагами Tesla Solar Roof є висока міцність матеріалу, привабливий зовнішній вигляд, доступна вартість, яка навіть нижча за традиційне черепичне покриття. В містах із щільною забудовою поверхонь дахів часто замало задля достатнього виробництва електроенергії. Збільшити поверхню можливого встановлення сонячних панелей пропонується за рахунок використання поверхонь вікон. В Україні розроблені і виробляються сонячні жалюзі SolarGaps, які можуть розміщуватися як із зовнішньої, так і з внутрішньої сторони вікна [11]. Потужність жалюзі становить 150 Вт/м² для зовнішнього і 100 Вт/м² для внутрішнього розміщення. На думку розробників у трикімнатній квартирі з вікнами на південь жалюзі зможуть виробляти до 600 Вт/год або 4 кВт*г/день, тобто 100 кВт*год/місяць. Середнє споживання енергії квартири, як вважають автори, коливається у межах 100-250 кВт*г. Автори розробки вважають, що відключитися від зовнішньої мережі можливо при

обладнанні 10 м² вікон, що виходять на сонячну сторону. Як акумулятори пропонується використовувати пристрій Tesla Powerwall. Оцінка вартості переобладнання одного вікна у звичайній квартирі становить \$300, а промислові рішення для торговельних та бізнес-центрів – \$150/м². У відгуках на цю інформацію заперечується можливість окупності сонячних жалюзі не тільки у прийнятні терміни, а й взагалі, враховуючи високу вартість їхнього встановлення (\$300 за вікно) та вартість системи Tesla Powerwall – від \$3000 до \$3500. Слід також звернути увагу на те, що потенціал ВДЕ в Україні менший, ніж у наведених прикладах. Дійсно, міста Каліфорнії мають значно більший потенціал сонячного випромінювання і використовують відчутну енергію вітрів з Тихого океану. Прибалтійські міста Європи також мають значний вітровий потенціал. Основні витрати на енергозабезпечення українські домогосподарства несуть на опалення та гарячу воду. Тому основним пріоритетом для України в галузі енергозбереження є термомодернізація будинків. Українське законодавство це враховує і стимулює утеплення будинків так званими «теплыми» кредитами. Законом України «Про альтернативні джерела енергії» «зелений» тариф на теплову енергію з біомаси встановлений у розмірі 90% від тарифу на енергію, що виробляється на природному газі.

Використання місцевих джерел енергії. В Україні серед місцевих джерел енергії найбільший потенціал, який широко використовується в Європі та в світі, мають тверді побутові відходи. Підраховано, що за умови часткового сортування відходів можна використати для виробництва енергії половину їхнього потенціалу, що для України оцінюється в еквіваленті природного газу у 1,5 млрд. м³, що становить 11,9% від обсягу газу, що відпускається населенню підприємствами системи «Теплокомуненерго». Доцільно переробляти у біометан також харчові відходи, частка яких близька до 40%, з додаванням рослинних відходів. Використання біометану поряд з природним газом у стисненому і зрідженому станах набуває поширення у транспортній енергетиці країн Європи.

До числа місцевих джерел енергії, доступних у містах як щільної, так і котеджної забудови, відноситься теплота водоймищ та геотермальна енергія приповерхневих шарів ґрунту. Перевагами цих джерел на відміну від вітру та сонця є стабільність параметрів, а недоліком – низький енергетичний потенціал, для використання якого необхідно витрачання певної кількості енергії за допомогою теплових насосів. В Інституті газу НАН України розроблено ряд пропозицій щодо ефективного енергетичного самозабезпечення міст України з використанням локальних джерел енергії або в комбінації з відновлюваними джерелами.

Прибережні міста України Одеса, Чорноморськ, Південний, Миколаїв, Херсон, Бердянськ, Маріуполь та ряд інших мають невичерпне джерело низькопотенційної теплової енергії Чорного та Азовського морів. В Інституті газу НАН України розглянуто техніко-економічну ефективність використання теплоти води Чорного моря задля підвищення ефективності енергопостачання центральної частини м. Одеса шляхом будівництва теплонасосно-когенераційної станції. Прикладом впровадження подібної системи є найбільша в світі теплонасосна станція на морській воді з розрахунковою температурою +3 °C Värtan Ropsten (Стокгольм, Швеція) в складі шести теплових насосів Unitor® 50FY сумарною потужністю 180 МВт.

Сьогодні енергопостачання м. Одеса здійснюється від фізично і морально застарілої ТЕЦ, яка використовує природний газ. Задля ефективного енергопостачання центральної частини міста пропонується на базі ТЕЦ побудувати теплонасосно-когенераційну станцію (ТНКС) зі встановленою тепловою потужністю 80 МВт. Станція буде працювати з максимальним навантаженням протягом всього опалювального сезону, що забезпечить найкоротший термін окупності інвестицій. У найхолодніші періоди опалювального сезону додатково до ТНКС можуть бути використані існуючі котли ТЕЦ. Когенераційна установка, що розглядається у ТЕО, споживає природний газ і виробляє електричну та теплову енергію. Електрична енергія використовується для приводу компресорів теплових насосів, а тепла надходить споживачам. Теплові насоси використовують теплову енергію води Чорного моря, температура якої в районі м. Одеса на глибині 10 метрів не опускається нижче 6,8 °C. Через це коефіцієнт трансформації енергії у тепловому насосі становить не менше 3,65, тобто у разі використання однієї одиниці електричної енергії виробляється не менше 3,65 одиниць теплової енергії.

Застосування запропонованої теплонасосно-когенераційної системи дає змогу більш ніж у два рази знизити питомі витрати природного газу на виробництво теплової енергії в порівнянні з сучасними високоєфективними газовими котлами. Забір води з Чорного моря буде здійснюватися з глибоководної частини морського порту. Порт знаходиться на відстані близько одного кілометра від ТЕЦ. У літній період будуть працювати тільки когенераційні установки з електричною потужністю

17 МВт і тепловою потужністю 17 МВт, що підвищить ефективність інвестицій і знизить термін окупності капітальних витрат. Електрична енергія буде подаватися в електричну мережу, а тепла – в теплову мережу на потреби гарячого водопостачання. Питомі витрати палива на виробництво теплової енергії в котлах існуючої ТЕЦ складають 160,5 кг у.п./ккал, що відповідає коефіцієнту ефективності використання палива 89% (базовий варіант для порівняння). Капітальні витрати на створення ТНКС, які включають в себе витрати на теплові насоси, когенераційні установки, допоміжне обладнання і матеріали, проектування, монтаж і пусконаладжувальні роботи складають близько \$ 42,9 млн. Річна економія природного газу за рахунок використання ТНКС в опалювальний сезон складе в порівнянні з базовим варіантом 20,2 млн. м³. Це досягається за рахунок того, що питома витрата природного газу в ТНКС на 56% нижче, ніж в існуючій ТЕС (61 і 139 м³/Гкал відповідно). Якщо ТНКС працює тільки в опалювальний сезон, простий термін окупності капітальних витрат складе 8,1 років. Якщо КГУ в літній період будуть виробляти електроенергію і поставляти її в мережу, то простий термін окупності капітальних витрат зменшується до 6,8 років. Якщо при цьому буде також здійснюватися продаж теплової енергії в мережу для потреб гарячого водопостачання за ціною 1000 грн./Гкал, що істотно нижче, ніж платить населення, отримуючи гарячу воду в електробойлерах (2349 грн./Гкал), то простий термін окупності капітальних витрат складе 4,8 року.

Розроблене попереднє техніко-економічне обґрунтування розглядається тепlopостачальною організацією Одеси як один з варіантів модернізації системи централізованого тепlopостачання центральної частини міста. Проект є інвестиційно привабливим, екологічно чистим і не пов'язаний з технічними ризиками, оскільки може бути реалізований на типовому апробованому обладнанні.

Цікавим варіантом підвищення ефективності теплового забезпечення населення є комбіноване децентралізоване сонячне гаряче водопостачання із використанням локальних теплових джерел на основі ВДЕ, що розташовуються в безпосередній близькості від теплових споживачів. Перевагою таких систем є зменшення навантаження на генератор теплоти (котел) приблизно на 25%, а також відповідно зменшення діаметру теплопроводу та теплових втрат системи. Як локальні джерела використовуються екологічно теплові насоси або сонячні колектори з електричним догрівом. Україна має значний потенціал використання сонячної енергії: для Києва та Одеси середні значення рівня сонячної радіації за рік становлять 3,10 та 3,55 кВт/м²·день відповідно, що дозволяє отримати в середньому гарячої води за рік 63 та 72 л/м²·день відповідно. Залежно від обраного варіанту комплектації системи простий термін її окупності становить від 7,1 до 4,7 року. Впровадження таких систем знижує вартість гарячого водопостачання на 68%. Подальше їхній розвиток залежить від використання сонячних панелей задля одночасного виробництва електричної та теплової енергії [13].

Суттєвим внеском у вирішення проблеми енергетичного самозабезпечення міст може бути використання теплоти міських каналізаційних стоків. Температура води очищених каналізаційних стоків в містах України не знижується нижче 9 °С, що дає змогу розглядати їх як перспективні джерела низькопотенційної теплової енергії для систем централізованого тепlopозабезпечення на основі використання теплових насосів. Важливим фактором, що впливає на техніко-економічну доцільність використання цього джерела є відстань від каналізаційних очисних споруд (КОС) до точки врізання у міські теплові мережі. З урахуванням взаємного розташування КОС та теплових мереж можливість використання цього джерела задля самозабезпечення міст доведена для Запоріжжя, Вінниці, Львова. Для цих міст в Інституті газу НАН України розроблено попередні ТЕО, які свідчать щодо високої інвестиційної привабливості такого типу проектів, термін окупності яких не перевищує 5 років.

Тепловий еквівалент щорічної кількості мулових осадів міських каналізаційних стоків (ОСВ) в Україні становить 446 т.у.п. [14], проблема утилізації та знешкодження яких є проблемою світового масштабу, не вирішеною повною мірою до цього часу. Їхнє використання для виробництва електричної та теплової енергії відповідає світовій тенденції розвитку децентралізованої енергетики. Воно потребує попередньої підготовки, а саме – зневоднення, сушіння та грануляції з використанням сонячної енергії. Теплотворна спроможність отриманого палива становить 15-16 тис. кДж/кг. Економічно ефективною, прийнятною для умов України технологією утилізації осадів є їхнє спільне спалювання з іншими твердими паливами та відходами у котлах ТЕС та цементних печах. Вартість такого палива у рази нижча за вартість вугілля. Інститутом газу розроблено попередні ТЕО запровадження такої технології для Києва, Одеси, Херсону, Миколаєва, Білої Церкви, Чернігова. Зокрема, у Чернігові гранульоване біопаливо доцільно спалювати у вугільній ТЕЦ, яка розташована

поблизу КОС. Для об'єктів децентралізованої енергетики слід надати перевагу процесам газифікації або піролізу осадів з наступним використанням у когенераційних установках (КГУ) невеликої потужності. Такі КГУ максимально наближені до споживачів електричної та теплової енергії, що дає змогу у десятки та сотні разів скоротити протяжність магістралей для транспортування енергії та максимально використати термодинамічні вигоди когенерації. За існуючих цін на природний газ і електроенергію мала розподілена когенерація для міст економічно вигідна. За вартості газу у 2500 грн/тис. м³ собівартість електроенергії становить 0,38 грн/кВт*г; власну дешеву енергію міста можуть використовувати на муніципальні потреби (водопостачання, електротранспорт, вуличне освітлення).

Апробованою технологією, яка використовується у багатьох містах України (Київ, Житомир, Миколаїв, Кам'янець-Подільський, Бровари, Бориспіль та інші), є використання звалищного газу для виробництва електроенергії. Перспектива використання цієї технології задля міського енергетичного забезпечення пов'язана з комбінованим виробництвом електричної та теплової енергії у комунальному та промисловому секторі.

Висновки. Постачання електричної та теплової енергії для потреб міст із щільною забудовою в Україні відбувається майже виключно від централізованих джерел – ТЕЦ, ТЕС, районних котельень, АЕС, ВДЕ. В цей час частка ВДЕ у енергозабезпеченні таких міст незначна. Збільшення частки ВДЕ у енергопостачанні невідворотне, але викликає низку технічних та економічних проблем: акумуляція електроенергії, резервні потужності, зростання вартості енергії, обмеження виробництва електроенергії традиційними виробниками в періоди перевиробництва її ВДЕ з усіма негативними технічними та соціальними наслідками, створення систем регулювання параметрів мереж. Виробництво електричної енергії відновлюваними джерелами по показниках повернення інвестицій та нормованої вартості енергії за життєвий цикл джерела генерації наближається до показників для традиційних джерел.

У багатьох країнах поширюються масштаби будівництва будинків і навіть цілих поселень з нульовим споживанням викопних палив. Енергія постачається від ВДЕ та інших наявних ресурсів – гідроенергії, енергетичного використання відходів, біопалив. Приклади такого будівництва відносяться до будинків котеджного типу. Щодо щільної міської забудови, то переконливі рішення, які могли би бути прикладом для України, відсутні.

Найбільший ефект у енергозабезпеченні міст за часткового постачання енергії з ВД досягається за одночасного використання енергії твердих побутових відходів, каналізаційних стоків та термомодернізації будинків.

Жодна з технологій виробництва енергії ВД не забезпечує задоволення енергетичних потреб будинку без одночасного запровадження енергозберігаючих заходів, насамперед утеплення огорожуючих конструкцій, а також контролю та регулювання витрат, рекуперації теплоти, реконструкції систем водопостачання.

На прикладі м. Одеси вивчено можливість підвищення ефективності енергопостачання за рахунок використання низькопотенційної теплоти Чорного моря шляхом комплексного застосування теплових насосів та когенераційних установок. Залежно від загальної схеми видачі електричної та теплової енергії термін окупності станції знаходиться в межах від 8,1 до 4,8 року. Перспективним є локальне використання ВДЕ у системах гарячого водопостачання міст.

1. Кириленко О.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. Київ: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400с.

2. Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. Укренерго. 2019. 68 с.

3. BP Statistical Review of World Energy. 2019.

4. Почему у «зелёной» энергетики сложное будущее?

URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2019/pochemu-u-zelenoi-energetiki-slozhnoe-budushchee> (дата звернення: 15.03.2020)

5. Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2019.

URL: <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019> (дата звернення: 23.02.2020)

6. Watch The Growth Of Cities Using 100% Renewable Energy.

URL: https://www.fastcompany.com/40536335/watch-the-growth-of-cities-using-100-renewable-energy?utm_source=feedly&utm_medium=webfeed (дата звернення: 01.03.2020).

7. Renewable Energy World. Clarion Energy. August 12, 2019.

URL: <https://www.renewableenergyworld.com/?s=august+12%2C+2019> (дата звернення: 15.03.2020)

8. Єврокомісія визначила найзеленіше місто, яке використовує лише енергію з ВДЕ. URL: <https://mind.ua/news/20205077-evrokomisiya-viznachila-najzelenishe-misto-yake-vikoristovue-lishe-energiyu-z-vde> (дата звернення: 03.12.2019).

9. Умные дома: новая жизнь эстонских хрущевок. URL: <https://www.dw.com/ruru/умные-дома-новая-жизнь-эстонских-хрущевок/a-49789076> (дата звернення: 12.01.2020)

10. Солнечная черепица Tesla Solar Roof взамен обычной кровли. URL: https://building-tech.org/solnechnaya-cherepica-tesla-solar-roof-vzamen-obychnoj-krovli/?fbclid=IwAR3OMALnhc1QnCBmR8V97_6n_G7yQrOuA (дата звернення: 17.12.2019).

11. Солнечные жалюзи SolarGaps – стартап с производством в Украине. URL: https://elektrovesti.net/62552_solnechnye-zhalyuzi-solargaps-startap-s-proizvodstvom-v-ukraine (дата звернення: 17.12.2019)

12. Карп І.М., П'яних К.Є. Тверді побутові відходи як енергетичний ресурс. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 6. С. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.049>

13. Фотоэлектрическая панель для выработки электроэнергии и тепла. URL: <https://renen.ru/fotoelektricheskaya-panel-dlya-vyrabotki-elektroenergii-i-tepla/> (дата звернення: 28.04.2020)

14. Карп І.М., П'яних К.Є., П'яних К.К. Утилізація осадів стічних вод. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2019. № 2. С. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.05>

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ В СИСТЕМЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ УКРАИНЫ

И.М. Карп, академик НАН Украины, **Е.Е. Никитин**, докт. техн. наук, **К.Е. Пьяных**, докт. техн. наук
Институт газа НАН Украины,
ул. Дегтяревская, 39, Киев, 03113, Украина,
e-mail: karpkiiev@gmail.com; nikitin_ee@ukr.net; pyanykh67@gmail.com

В городах проживает 70% населения Украины. Обеспечение городов с плотной застройкой электрической энергией осуществляется, в основном, от централизованных источников генерации: ТЭС, ТЭЦ, АЭС, ВИЭ, а тепловой – от ТЭЦ и газовых котельных. Проанализированы возможности энергетического самообеспечения городов Украины на основе использования альтернативных и местных источников энергии. В энергообеспечении городов наблюдается мировая тенденция увеличения доли ВИЭ, особенно в городах и районах с коттеджной застройкой. Обеспечение городов собственными энергоресурсами может быть достигнуто при условии комплексного использования возобновляемых и местных источников. Производство электрической энергии возобновляемыми источниками по показателям возврата инвестиций EROI и нормированной стоимости энергии за жизненный цикл источника генерации LCOE приближается к показателям для традиционных источников. Приведены примеры использования ВИЭ для обеспечения энергетических потребностей домов и поселений в Европе. Высокая стоимость энергии из ВИЭ сдерживает развитие этого направления в Украине. Эффективность использования возобновляемых и местных источников в зданиях достигается только с одновременным введением энергосберегающих мероприятий – утеплением домов, внедрением систем контроля энергозатрат. Библ. 14.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, энергетическое самообеспечение городов, тепловые насосы, когенерация.

RENEWABLE SOURCES IN THE ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF UKRAINIAN CITIES

I.M. Karp, Y.Y. Nikitin, K.Y. Pyanykh
The Gas Institute of NAS of Ukraine,
39 Degtyarivska Str., Kyiv, 03113, Ukraine
E-mail: karpkiiev@gmail.com; nikitinee@ukr.net; pyanykh67@gmail.com

70% of the population of Ukraine lives in cities. Electric energy supply of cities with dense buildings is provided mainly from centralized generation sources: TPPs, CHPs, NPPs, RES, and heat energy - from CHPs and gas boilers. Possibilities of energy self-sufficiency of Ukrainian cities based on use of alternative and local energy sources are analyzed. There is a global trend of increasing share of RES in cities energy supply, especially in cities and districts with cottage development. Providing cities with their own energy resources can be achieved through integrated use of renewable and local sources. Production of electricity from renewable sources in terms of return on investment EROI and normalized energy cost over life cycle of LCOE generation source is close to traditional sources indicators.

Examples of RES usage to meet energy needs of houses and settlements in Europe are given. High cost of renewable energy stimulates development of this area in Ukraine. Efficiency of renewable and local sources usage in buildings is achieved only with simultaneous introduction of energy saving measures - insulation of buildings, introduction of energy control systems. References 14.

Key words: renewable energy sources, energy self-sufficiency of cities, heat pumps, cogeneration.

1. Kyrylenko O.V. Intelligent Electric Networks: Elements and Models. Kyiv: Instytut Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy, 2016. 400 p. (Ukr).
2. Report on conformity assessment (adequacy) of generating capacity. Ukrenergo. 2019. 68 p.(Ukr)
3. BP Statistical Review of World Energy 2019.
4. Why “green” energy has a difficult future? URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2019/pochemu-u-zelenoi-energetiki-slozhnoe-budushchee> (accessed 15.03.2020) (Rus)
5. Levelized Cost of Energy and Levelized Cost of Storage 2019. URL: <https://www.lazard.com/perspective/lcoe2019> (accessed: 23.02.2020).
6. Watch The Growth Of Cities Using 100% Renewable Energy. URL: https://www.fastcompany.com/40536335/watch-the-growth-of-cities-using-100-renewable-energy?utm_source=feedly&utm_medium=webfeed (accessed: 01.03.2020).
7. *Renewable Energy World*. Clarion Energy. August 12, 2019. URL: <https://www.renewableenergyworld.com/?s=august+12%2C+2019> (accessed 15.03.2020)
8. The Eurocommittee has started the most efficient place, which will be less energy from the new energy sources. <https://mind.ua/news/20205077-evrokomisiya-viznachila-najzelenishe-misto-yake-vikoristovue-lishe-energiyu-z-vde> (accessed: 03.12.2019). (Ukr)
9. Smart houses: a new life of Estonian “Khrushchev”. URL: <https://www.dw.com/ruru/умные-дома-новая-жизнь-эстонских-хрущевок/a-49789076> (accessed: 12.01.2020) (Rus).
10. Solar roof tiles Tesla Solar Roof instead of conventional roofing. https://building-tech.org/solnechnaya-cherepica-tesla-solar-roof-vzamen-obychnoj-krovli/?fbclid=IwAR3OMALnhc1QnCBmR8V97_6n_G7yQrOuA. (accessed: 17.12.2019) (Rus).
11. Solar blinds SolarGaps - a startup with production in Ukraine. URL: https://elektrovesti.net/62552_solnechnye-zhalyuzi-solargaps-startap-s-proizvodstvom-v-ukraine. (accessed: 17.12.2019) (Rus).
12. Karp I.M., Pyanykh K.Y. Municipal solid wastes as energy resource. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 6. Pp. 49-58. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.06.049> (Ukr).
13. Photovoltaic panel for power and heat generation. URL: <https://renen.ru/fotoelektricheskaya-panel-dlya-vyrabotki-elektroenergii-i-tepla/> (accessed: 28.04.2020) ((Rus))
14. Karp I.M., Pyanykh K.Y Pyanykh K.K. Utilization of sewage sludge. *Energotekhnologii ta resursozberezhennia*. 2019. No 2. Pp. 34-48. DOI: <https://doi.org/10.33070/etars.2.2019.05> (Ukr).

Надійшла 06.04.2020
Остаточний варіант 05.10.2020