

УДК 332

Ю.С. Рябініна,

магістр

ORCID: 0000-0003-4024-2314

Т.Ю. Цифра,

канд. екон. наук, доцент

ORCID: 0000-0001-7891-0467

Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ВІКОННІ СИСТЕМИ: ВИДИ, РОЗВИТОК, ПОРІВНЯННЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Тенденція використання природних копалин зменшується, на перші позиції виходять енергозбереження та екосистеми. Тому використання скляного оздоблення будівель стало відправною точкою у пошуку нових технологій збереження використання електроенергії, зменшення потреб у кондиціонуванні та додатковому освітленні. Розроблене смарт-скло є вдосконаленим типом скла, яке здатне змінювати прозорість в залежності від різних умов, або переробляти сонячне світло в електроенергію, якою можливо користуватись на потреби людини. В роботі досліджується поява перших видів смарт-вікон, та подальшої розробки смарт-вікон з використанням різних плівок, хімічних та органічних сполук. Перспективність використання розумного скла для поліпшення природного освітлення в різних сферах та майбутні можливості пов'язаних технологій методами порівняння декількох видів смарт-скла. Наведено основні види смарт-вікон: фотохромне вікно, термохромне вікно, електрохромне вікно, рідкокристалічні вікна, вікна на основі зважених частинок, вікно з використанням «Теплового дзеркала». На основі наведеної характеристики різних технологій смарт-скла виявлено його переваги та недоліки, також пов'язані з ними складності, які в перспективі повинні бути дозволені. Сформована класифікація смарт-вікон за типом використання в них плівок, та їх переваги та недоліки використання. Описується основні новітні технології поглинання сонячного світла поверхню вікна, та конвертацією світла в електроенергію, проблематика досягання прозорості склом, та тенденція розв'язання цього питання. На конкретних прикладах розглянуто області застосування скла з керованою прозорістю, та отримані економічні показники при його використанні в будівлях. Розглянуто технологію використання сонячних батарей у виді жалюзів та їх вплив на забезпечення будівлі енергією.. Виявлено, що з розвитком техніки та технології виробництва смарт-скла відбулося поліпшення деяких його оптичних властивостей, що сприяло зменшенні його вартості, що веде до збільшення доступності даного матеріалу.

Ключові слова: *енергоефективність, смарт-вікна, оздоблювальні озородження, електроенергія, кондиціонування, розумне скло, будівельні технології.*

Вступ. За останні 20 років ми стали свідками великого прогресу. Сучасні технології вражають. Людина намагається зробити своє життя більш привабливим, різноманітним, простим та розумним. Як не дивно, але стан нашої

планети в цілому впливає на розвиток технологій: нові проблеми, катаклізми, а з ними й нові потреби людини прямо залежні один від одного. Потреба людини в ресурсах нескінченно збільшується, але запаси природних невідновлюваних копалин зменшуються. Тому тенденція використання природних копалин для споживання людиною почала виходити на останні позиції, на перші позиції виходять енергозбереження та екосистеми. За даними International Energy Agency (IEA) у світовому вимірі постачання первинної енергії за період з 1973 по 2015 роках збільшилися у 2,2 раза, а споживання - у 2,0 рази. При цьому на частку нафти довелося 31,7%, вугілля - 28,1% і газу - 21,6% [1].

Зі швидким розвитком альтернативних видів виробітку енергії, таких як сонячна та вітрова електроенергія, та переважно легким їх впровадженням у наше життя з різних боків, ми отримали нові способи використання цих видів енергії в будівництві та архітектурі. Особливо важливі для України програми енергозбереження, яка імпортує енергоносії. Причому в нашій країні понад 30% кінцевої енергії споживають будівлі. Водночас, через відсутність належної енергоефективності втрати тепла в них складають 47%. При цьому, наприклад, в панельних п'ятиповерхових будинках структура втрат тепла формується таким чином, у %: інфільтрація - 35, стіни - 30, вікна - 23, підлогу 1-го поверху - 7, перекриття горища - 5 [2]. Тому, питання збереження тепла та зменшення використання енергії стало гостро актуальним. Одночасно, розробки нових ефективних огороджувальних конструкцій стали первинною потребою задля збереження тепла.

Зростання кількості населення збільшилося за останні 20 років на 28,5%. Щільність населення в містах стала значно збільшуватися, а з нею і потреба в новій житлоплощі. Міста почали рости вгору, а не вишир. Хмарочоси є результатом даної проблеми. Постала потреба в легких та ефективних огороджувальних конструкціях. Тому використання скла в будівництві, як провідного матеріалу в нових технологіях оздоблювання будівель, стало провідним. А додавши питання обслуговування цих будівель, їх опалення та потреби в електроенергії, було вирішено почати розробку нових технологій використання скляних огороджувальних конструкцій та пошук розв'язання питань зі зменшення використання опалення, потреби в кондиціонуванні та навіть використання електроенергії. Скління будівель стало ще одним влучним рішенням, бо скло є недорогим та естетично привабливим, завдяки якому, можливо використовувати його у різному виді, та надавати йому певних властивостей для конкретного виду використання. Скло стало матеріалом завдяки якому ми маємо змогу економити електроенергію за природне освітлення. Крім того, широке коло видів скла та їх характеристик, сприяли розвитку його різноманітного використання.

В статті розглянуті декілька видів скла та технологій використання сонячного світла, які надалі було б можливо використовувати задля економії електроенергії, зменшення обсягів використання кондиціонування, та додаткового освітлення. Наведено їх порівняння та висновки.

Аналіз досліджень і публікацій. Публікація американської компанії SolarWindow Technologies, яка розробляє амбітний проект генерації сонячної енергії, вважає, що скоро ми зможемо замінити сонячні батареї на дахах звичайним склом з додатковим спеціальним покриттям. Розроблена технологія нанесення розчину з азоту, водню, кисню та вуглецевого матеріалу, що застигає при низьких температурах, та являє собою тонку прозору органічну плівку, що

здатна виробляти більш енергії, ніж сонячні батареї.

Організація National Renewable Energy Laboratory (NREL) розробила прототип вікон, що здатні зменшувати температуру будівлі завдяки можливості зміни прозорості, та генерують електроенергію. Дослідження описує використання матеріалу перовскиту для надання склу цих властивостей. Також наведені результати розрахунків зменшення потреби в опаленні, вентиляції, а також особливості використання даної технології та ККД вікон.

Італійський стартап Glass to Power розробив люмінесцентні сонячні концентратори (LSC), які можуть бути інтегровані в вікна, а також ряд інших активних архітектурних елементів. Компанія стверджує, що досягла ефективності перетворення 3,2% при ступені прозорості видимого спектра близько 80%.

Український підприємець Євген Ерік розробив технологію використання сонячних панелей як жалюзі, що за розрахунками можуть забезпечити будівлю повністю електроенергією, та значно знизити затрати на кондиціонування будівлі.

Дирка Йодике (Dirk Jodicke) та Хартмута Витткопфа (Hartmut Wittkopf) зробили доклад про повне оновлення першого покоління електрохромних вікон, виготовлення скління 2-го покоління та реалізації їх в проєктах.

А.Е. Донцова, А.В. Калініна провели дослідження перспективності використання скління для поліпшення природного освітлення в різних сферах методом порівняння трьох видів смарт-вікон, виявлення їх переваг, недоліків, складнощів, та темпи їх подальших вирішень.

А.В. Лобовку провів дослідження тенденцій, стану та перспектив розвитку та використання енергозберігаючих віконних систем. Зібрав історичні дані про розвиток смарт-вікон різних держав.

Постановка завдання. Метою роботи є виявлення перспектив використання смарт-вікон, порівняння принципів їх роботи та впливу їх використання на подальший розвиток будівництва в цілому. Задачі:

- Розгляд видів та технологій виготовлення смарт-скла;
- Аналіз переваг та недоліків матеріалу;
- Оцінка перспективи використання «розумного скла».

Методи дослідження полягають в аналізі наявних видів смарт-вікон, їх порівнянні.

Основна частина. Вікна - це особлива частина будівлі, це її очі. Достатня проникність світла в будівлю необхідна для нормального існування людини. З часом вчені змогли порахувати скільки потрібно світла та часу мінімально заповнювати простір в приміщенні, та розробили будівельні та санітарні норми, й інші галузеві норми.

Природне освітлення житлових приміщень прямими сонячними променями, за ДБН В.2.5-28:2018 «Природне та штучне освітлення», повинно бути не менше трьох годин на добу, а для громадських будівель інсоляція приміщень небажана через виникнення сонячних відблисків на моніторах і робочих поверхнях. Також зі зростанням щільності забудови міст, розпочався пошук нових ідей та технологій задля розв'язання цих питань.

Полягають, що перший етап в розробці енергоефективних віконних конструкцій настав ще в 1865 році, коли Томас Стетсон (Thomas D. Stetson) отримав патент США на віконний блок зі двома скляними панелями [1]. Звісно, цей патент потребував значного перевороту у сфері віконного виробництва: додаткових технологій виготовлення та монтажу. Тому реалізація і подальший

розвиток буди не швидкими.

Другим етапом у створенні енергозберігаючих віконних конструкцій стала розробка в 50-х роках ХХ століття низькоемісійних плівок на базі металополімерних композитних покриттів скла. Це дало змогу надати значну кількість додаткових і різноманітних властивостей склу, що й сприяло всебічному розвитку технологій виготовлення віконних систем та розширення сфер використання, насамперед, завдяки збільшенню експлуатаційних властивостей віконних конструкцій. Механізм дії низькоемісійних плівок (Low-E), використовуючи в віконних системах, складається в блокуванні значної кількості теплопередачі від сонячного випромінювання, тип самим зменшуючи вхідний тепловий потік в приміщення будівлі. Плівки виготовляють з композита, що являє собою метали, напівпровідники та діелектрики.

Третій етап розпочався при використанні низькоемісійних самоклеючих плівок, що наносився на звичайне скло вікна. Прикладом такого товару є плівки торгової марки EnerLogic від американської компанії Solutia Inc. У 2010 році на ринок була введена «Низькоемісійна віконна плівка EnerLogic 35», яка трансформує одношарове вікно у двошарове, а однокамерний склоблок - в тришаровий. За даними розробника плівка «EnerLogic 35» має коефіцієнт теплопровідності (U) 0,589 взимку і 0,424 влітку при коефіцієнті теплового опору (R) 1,974. Подальший розвиток і технічні ідеї компанії були реалізовані у 2012 році у продукті EnerLogic 70, який забезпечує передачу до 70% видимого світла і є енергоефективним [5,6].

Наступним етапом, розпочинаючи з 2009 року, ринок смарт-вікон значно розширюється шляхом росту популярності та попиту на вікна з регульованою прозорістю. Ці інноваційні властивості скла дозволять електроенергетиці вийти на новий рівень розвитку та значно знизити потребу будівель та загалі людства в сировинних ресурсах, завдяки змозі регулювати прозорість скла, обирати як і коли використовувати його властивості задля збереження тепла, зменшення потреб у кондиціонуванні будівель, та додатковому освітленні приміщень.

Таблиця 1

Основні види смарт технологій віконних систем [13-16]

| Види Smart - вікон | Конструктивні рішення | Виконуючі функції | Країни-виробники комерційної продукції |
|--------------------------------------|---|---|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Фотохромне (photochromic) вікно | Використання добавок, поглинаючих сонячну енергію | Реагує на зміну світлового потоку | - |
| Термохромне (thermochromic) вікно | Скло з термохромним покриттям | Регулює світловий потік в залежності від навколишньої температури | - |
| Електрохромне (electrochromic) вікно | В основному використовується оксид вольфраму між двома склами | Змінює прозорість під впливом керуючого електричного сигналу | Німеччина, Нідерланди, США, Швеція, |

Закінчення табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|--|--|---|-----------------------------------|
| Рідкокристалічні (Liquid crystal-based) вікна | Зміна орієнтації рідкокристалічних молекул між двома провідними електродами | Змінює прозорість під впливом керуючого електричного сигналу | Іспанія, США, Франція, Японія |
| Вікна на основі зважених частинок (suspended-particle devices) | Складаються з 3-5 шарів, активний шар адсорбує дипольні голкоподібні або сферичні частинки | Поглинання світла в вимкненому стані, і пропускання світла при додаванні електричного поля | Німеччина, Ірландія, Іспанія, США |
| Вікно з використанням «Теплового дзеркала» (Heat Mirror) | Тонка прозора тканина, змонтована усередині склопакета | Взимку відбивають випромінювання опалювального приладу всередину приміщення, а влітку - сонячне випромінювання назовні вікна. | США |

Смарт-скло, яке вміє змінювати прозорість при зміні макропараметрів [3]:

1. Полімерний рідкокристалічний шар (PDLC - Polymer Dispersed Liquid Crystals). У полімерних рідкокристалічних пристроях суміш рідких полімерних кристалів диспергують в рідкий полімер, після чого тверднуть. У цьому процесі рідкі кристали стають несумісними з твердим полімером і формують крапління в полімері, що призводить до зміни властивостей смарт-скла. Без напруги, рідкі

кристали не впорядковані, що призводить до розсіювання паралельних променів світла і створення непрозорої матово-білої структури. При подачі напруги на провідні шари рідкі кристали приймають положення, перпендикулярне площині електропровідного шару і забезпечують прозорість.

2. На зважених частинках (SPD - suspended particle devices). Між двома шарами скла поміщається тонка плівка шаруватих матеріалів стержнеобразних за структурою частинок, зважених в рідині. Якщо напругу не докладено, зважені частинки орієнтовані випадково і поглинають світло, так, що скло набуває темно-синій, сірий або чорний відтінок. Якщо напругу докладено, зважені частинки вирівнюються і скло стає прозорим. Відмінністю даного скла є те, що воно оптично проникливе в будь-якому стані.

3. Електрохромний шар (ECD - ElectroChromatic Devices). Змінний шар в даній технології складається з напилювання іонів літію. Прозорість матеріалу регулюється подачею напруги, при цьому контролюється кількість світла, що пропускається і тепла і стан змінюється між кольоровим, напівпрозорим станом і прозорим. Подача напруги необхідна тільки для зміни ступеня прозорості, а для підтримки досягнутого стану необхідність в електроживленні відсутня.

При влаштуванні електрохромних вікон замість звичайних з тонуванням, потреби в кондиціонуванні можливо знизити до 49%, знизити пікове напруження в мережі до 16%, знизити витрати на освітлення на 51%. Як результат, взимку вони не випускають тепло назовні, відбивши його всередину приміщень. Це знижує витрати тепла в 4,5 рази у порівнянні зі звичайним склопакетом. До того ж,

дивлячись на те, що робота цих вікон потребує електричного струму, потреба не значна. Щоб використовувати електрохромні вікна загальною площею 140 кв.м знадобиться стільки ж електричного струму, скільки потрібно для роботи 60-ваттної лампи розжарювання. [4].

Кожен з цих видів має свої плюси та мінуси, що приводить до різних сфер їх використання: від влаштування в офісних приміщеннях до автомобільного скла та алюмініаторів літаків.

Таблиця 2

Класифікація за типом використання плівок

| Вид плівки | Переваги | Недоліки |
|--|---|---|
| Етіленвінілацетатна плівка (EVA). | <ul style="list-style-type: none"> - володіє хорошим зчепленням до пластику і скла, - низька вартість як плівки, так і обладнання для її виготовлення. | <ul style="list-style-type: none"> - висока каламутність при багатошаровому ламінуванні, - чутливість до вологості та низьких температур, - високу ймовірність розшарування. |
| Полівінілбутиральна плівка (PVB). | <ul style="list-style-type: none"> - володіє хорошим зчепленням зі склом, - при низькій вартості даної технології готовий продукт має досить високу якість. | <ul style="list-style-type: none"> - володіє низьким зчепленням зі пластиком, - чутливість до вологості. |
| Плівка з термопластичного поліуретану (TPU). | <ul style="list-style-type: none"> - володіє високим зчепленням з пластиком і склом, - не впливає вологість, механічні навантаження і дії агресивних середовищ. - висока якість, - змога використання для виробництва виробів скління для аерокосмічної галузі. | <ul style="list-style-type: none"> - висока вартість плівки і обладнання. |

Смарт розробки.

Підтримка спонсорів та інвесторів дозволяє не зупиняючись розвивати данні технології. Але технологічні можливості ще не вичерпані.

Як приклад, було розроблено технологію поглинання сонячного світла поверхнею вікна, та конвертацією світла в електроенергію, що можливо використовувати для потреб будівлі. Так, організація National Renewable Energy Laboratory (NREL) достатньо давно працює над створенням ефективного прототипу вікон зі склом, що грає роль сонячних батарей. Тобто, вони служать як термометр для приміщення – можуть змінювати їх температуру завдяки зміні своєї прозорості, та генераторами електроенергії з сонячного світла. Зараз ККД цього типу вікон 11,3%. Чим прозорість такого скла нижча, тим більше енергії конвертують вікна. При освітленні фототермічне нагрівання активізує шар поглинача, що складається з комплексної сполуки - перовскит-метиламінового галогеніда, з прозорого стану (68% видимого пропускання) в поглинаючий «фотовольтаїчний кольоровий» стан (пропускає менш як 3% видимого випромінювання) через дисоціації метиламіну. Після охолодження комплекс метиламін відновлюється, повертаючи шар абсорбера в прозорий стан, в якому пристрій діє як звичайне вікно, пропускає видиме світло. Сучасна панель здатна

робити впродовж 25 років (приблизно 9000 циклів) [7].

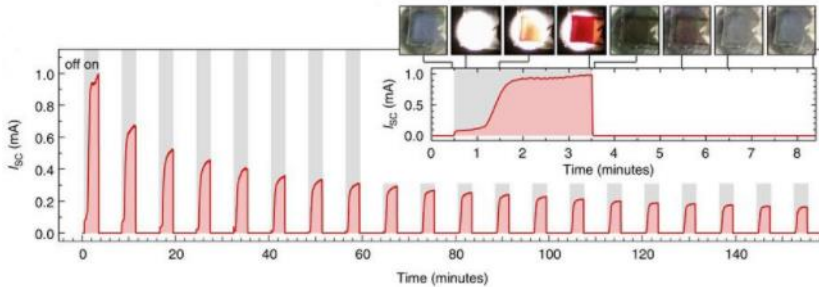


Рис. 1. Зображення графіку збільшення виробітку енергії при зміні стану скла від повністю прозорого до непрозорого стану

Як зазначають розробники, зараз максимальна продуктивність скла можлива лише при першому циклі, над чим і працюють вчені. Також, регулювання прозорості скла в даній технології є ще неможливою, що звужує коло використання даних віконних систем. Можливе влаштування таких вікон по черзі зі звичайними, задля збереження більшої кількості світла за потреби, або в місцях де постійна потреба у світлі не є актуальною.

Вчені з Мічиганського університету змогли розв'язувати питання з прозорістю скла при конвертуванні сонячного світла в електроенергію. В даному випадку, вони розробили технологію «сонячного концентрату»: органічні солі поглинають ультрафіолетові та інфрачервоні випромінювання, концентруючись всередині панелі вони переходять в інфрачервоний діапазон, відображаючись від поверхонь панелей всередині переходять до краю панелі, та завдяки розташованим там вузьких смужок зі звичайних фотовольтаїчних панелей, які поглинають світло, виробляється енергія. На жаль ККД таких вікон досягає зараз лише 1%, і не може повністю використовуватись в повсякденному житті [8].

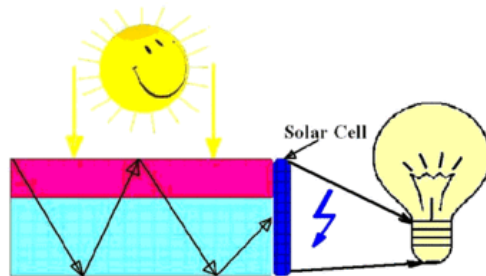


Рис. 2. Рух випромінювання в технології «сонячний концентрат»

Щодо актуальності такої технології навіть з таким маленьким ККД у 1%, можемо розрахувати скільки така панель буде давати кВт. Нехай наш хмарочос має розміри 380 x 130 метрів, як Empire State Building. Площа поверхні скління, таким чином – 49 400 кв.м, приймаємо 50 000 кв.м. Кут падіння сонячних

променів буде змінюватися весь день, прийємо, 60 градусів. Падаючий потік в сонячний день при максимальній освітленості при чистому небі (освітленість 100 000 лк): $100\,000 \times 50\,000 \times \cos 60 = 2\,500\,000\,000 \text{ Вт} = 2\,500 \text{ МВт}$. У похмурий день буде на порядок менше (освітленість 2000 лк): $2\,000 \times 50\,000 \times \cos 60 = 50\,000\,000 \text{ Вт} = 50 \text{ МВт}$. При ефективності в 1% така панель буде давати 25 МВт в сонячний день і 0,5 МВт у похмурий.

Американська компанія SolarWindow Technologies у 2016 році виходить на ринок генерації сонячної енергії з досить амбітним проектом. Вони продовжили розробку колег з Мічиганського університету технології «сонячний концентрат». Як вважають його автори, сонячні батареї на дахах будинків цілком можуть бути замінені склом звичайних вікон. На скло наноситься спеціальне рідке покриття, яке потім засихає під впливом низьких температур. Вона виконана з вуглецевого матеріалу, водню, азоту і кисню. В результаті формується тонка прозора органічна плівка. Процес вимагає нанесення декількох шарів, один з яких - так званий, активний шар - виробляє електрику. Для передачі електрики в покритті SolarWindow використовуються мікроскопічні канали (зліва), які в два рази тонше за людську волосину (праворуч).

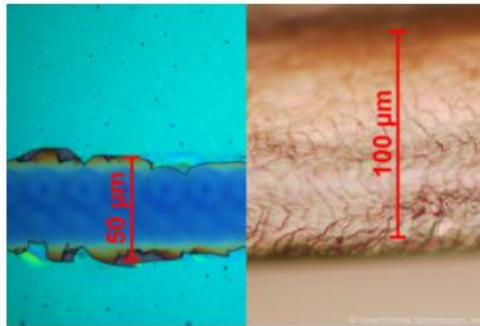


Рис. 3. Для передачі електрики в покритті SolarWindow використовуються мікроскопічні канали (зліва), які у два рази тонше за людську волосину (праворуч) [9]

Технологія може застосовуватися двома способами. Покриття можна нанести як на вже встановлені вікна, так і на склопакети до їх монтажу - знадобляться лише послуги електрика, який проведе необхідні дроти. Розробники стверджують, якщо покрити всі скляні поверхні сучасного хмарочоса складом від SolarWindow, то 30-50% необхідної будівлі енергії можна буде отримувати від сонця. Витрати на установку сонячних панелей в 50-поверховому будинку окупляться через рік. У компанії також стверджують, що за допомогою «сонячних» вікон можна виробляти в 50 раз більше енергії, ніж від фотоелектричних установок на даху. При цьому покриття виробляє електрику не тільки від сонячного світла, але і від штучного.

Головна проблема технології SolarWindow - це неможливість зробити вікна повністю прозорими. Вуглецевий шар робить скло затемненим, а підвищення енергоефективності робить тонування ще більш помітним. Стартап вже 7 років удосконалює технологію, але максимум, якого вдалося досягти, - це 80%

прозорість [9]. Технологія, розроблена стартапом, може також застосовуватися в автомобільній індустрії. Люк в автомобілі з відкритим верхом, лобове скло і бічні дзеркала можна також перетворити в систему збору сонячної енергії. Методика підійде для розробок у військовій, аерокосмічній і текстильній галузях.

SolarWindow не єдина компанія на ринку, яка планує перетворити хмарочоси в сонячні електростанції. Подібні продукти розробляють також британська Oxford PV, американські Solaria і Ubiquitous Energy, іспанська Onyx Solar.

Дослідники, очолювані Ян-Яном Сонгом з Північно-Східного університету в Шеньяні, Китай, та Сінь-Хуа Ся з Нанкінського університету в Нанкіні, Китай, опублікували статтю про нове стерильне розумне вікно. Як пояснюють дослідники, інтеграція декількох функцій в одне розумне вікно представляє складність, оскільки кожна функція зазвичай вимагає різного складу матеріалу. Наприклад, одним із найбільш широко використовуваних матеріалів для розумних вікон, що контролюють пропускання видимого світла, є WO_3 (триоксид вольфраму). Як електрохромний матеріал, WO_3 може оборотно змінювати свій оптичний коефіцієнт пропускання у відповідь на електрохімічний заряд і розряд. З іншого боку, у розумних вікнах, які перетворюють ближнє інфрачервоне сонячне випромінювання в тепло, як правило, беруть участь наночастинки металу. Також широкий спектр матеріалів має протимікробні властивості, особливо мідь. Поки що, однак, поєднання всіх цих властивостей в одному матеріалі залишалося проблемою.

У своєму дослідженні вчені спроектували електрохромно-фототермічну плівку, складену з 3D WO_3 , у структурі, подібній до стільників, вкленої в наночастинки золота та нанородів. Поки WO_3 контролює кількість видимого світла, яке проходить через вікно, золоті наноструктури перетворюють надходять сонячне світло в теплову енергію для опалення інтер'єру будівлі. Ця стратегія досягає чудового фототермічного перетворення за рахунок оптимізації сонячного підсилення на електрохромних плівках, і, що важливо, ефективність фототермічного регулювання під час оптичної передачі [10].

Дослідники продемонстрували, що вікно може змінитись із повністю прозорого на темно-чорний протягом декількох хвилин. Крім того, вони показали, що інфрачервоний лазер підвищує температуру вікна на $24^\circ C$ приблизно за п'ять хвилин. Щоб дослідити антимікробні властивості вікна, дослідники обробили його кишковою паличкою та опромінили ближньо-інфрачервоним лазером. Вони виявили, що бактерицидний ефект був найсильнішим, коли вікно було в темному стані, в якому воно могло знищити практично всі бактерії. Навпаки, ефект був набагато слабкішим для вікон у прозорому стані, а також для вікон, виготовлених лише з WO_3 або лише золоті наноструктури, а не обидва матеріали разом узяті [10]. Результати дозволяють припустити, що більшість бактерицидних ефектів зумовлені фототермічними властивостями вікна. Стерильне розумне вікно буде особливо корисним у літаках, а також у лікарнях.

Джеремі Мандей та його колеги звернули увагу на те, що більшість наявних розумних вікон, що працюють на сонячних батареях, розроблені для автоматичного реагування на мінливі умови, такі як світло або тепло. Але це означає, що в прохолодні або похмурі дні споживачі не можуть натиснути перемикач і тонувати вікна для забезпечення конфіденційності. Крім того, ці пристрої часто працюють на частку світлової енергії, якій вони піддаються, тоді як решта поглинається вікнами. Це нагріває їх, що може додати тепла приміщенню,

яке вікна повинні допомагати зберігати прохолоду. Тому дослідники вирішили усунути ці обмеження, та створили нове розумне вікно, закріпивши між двома скляними панелями полімерну матрицю, що містить мікрокапельки рідкокристалічних матеріалів, і аморфний шар кремнію - тип, який часто використовують у сонячних елементах. Коли вікно "вимкнено", рідкі кристали розсіюють світло, роблячи скло непрозорим. Кремнієвий шар поглинає світло і забезпечує низьку потужність, необхідну для вирівнювання кристалів, щоб світло могло проходити крізь нього і робити вікно прозорим, коли вікно вмикається користувачем. Додаткова енергія, яка не спрямовується на роботу з вікном, збирається і може бути перенаправлена на живлення інших пристроїв, таких як світло, телевізори або смартфони [11].

Український підприємець Євген Ерік пропонує досить оригінальне і відносно недороге рішення використання сонячного світла задля економії потреб в кондиціонуванні та додатковому отриманні енергії для забезпечення будівель: енергогенеруючі сонячні жалюзі. Стандартне вікно, обладнане таким незвичайним пристроєм, зможе виробляти (при оптимальних умовах) до 100 кВт електрики на місяць. Вартість таких фотоелектричних жалюзів становитиме приблизно 300 доларів (з монтажем). Пристрій SolarGaps є фотоелектричні елементи, які монтуються на віконні жалюзі з внутрішньої або зовнішньої частини віконного отвору. Ці модулі перетворюють сонячне випромінювання в теплову та електричну енергію, роблячи приміщення незалежним від зовнішніх електричних мереж.

Потужність SolarGaps на квадратному метрі віконного отвору досягає 150 Ватт при зовнішньому розміщенні жалюзі і до 100 Ватт при внутрішньому. Тож підрахувати, що жалюзі SolarGaps, встановлені в трикімнатній квартирі з вікнами, що виходять на південь, здатні виробляти до 600 Ватт на годину або близько 4 кВт в день, а це 100 кВт на місяць, при споживанні квартири від 100 до 250 кВт в місяць. Економія тільки на кондиціонуванні за рахунок блокування прямих сонячних променів може досягати 90% [12]. Тож, одержувану енергію можна використовувати для роботи комп'ютерів, побутової техніки та освітлення.

Висновки. Були розглянуті різні види смарт-скла, що відрізняються один від одного оптичними характеристиками, такими, як ступінь прозорості та матовість, властивостями, цілями використання, методами використання, та основною технологією виготовлення. Ці властивості визначаються будовою шару смарт-плівки, прикріплюється до скла. Було виявлено, що скло на зважених частинках більше підходить для установки на скло автомобілів, а скло з електрохромним шаром - для житлових і офісних приміщень, оскільки воно не потребує подачі напруги для підтримки прозорості. Недоліками смарт-скла нині залишаються висока вартість і енерговитратність, не 100% прозорість при виробітку електроенергії. Необхідно враховувати, що дані проблеми знаходяться на стадії рішення, так як розвиток техніки і технології стрімкий, а також існує достатньо багато фінансових вкладень в досліджувану сферу. Ми можемо сміливо говорити про такі позитивних якостях даного матеріалу, як естетична виразність і багатофункціональність, адже даний матеріал одночасно поєднує в собі функції звичайного скла, світлового затвора і проекційного екрана. Широкий ряд переваг скла з керованою прозорістю забезпечує матеріалу перспективність і широку сферу використання. Смарт-вікнам було знайдено застосування не тільки у сфері цивільного будівництва, а й авіабудівної та автомобільної галузях, а також у

рекламній індустрії. Використання скла з регульованою прозорістю показує рівень розвитку техніки та технології в сучасному світі, а також вказує на те, що з плином часу цей тип скла поліпшується, що призводить до збільшення його доступності. Дослідження нової й нової змоги вчених розробити ще кращі сполуки, ще кращі варіанти поєднання матеріалів, пошук нових технологій говорить про стрімкий розвиток даної сфери, що у свою чергу призводить до появи різних схожих технологій, як смарт-жалюзі. Використання сонячних батарей в різних формах залучає суспільство економити на додатковому опаленні, кондиціонуванні та освітленні приміщень.

Список літератури:

1. Лобовку А.В. Энергозберігаючі віконні системи: стан, тенденції та перспективи / А.В. Лобовку // Молодий вчений. – 2018. – № 18 (204). – С. 75-80. – URL: <https://moluch.ru/archive/204/49863/>
2. Лапа М. Забезпечення енергоефективності будівель / М. Лапа, М. Двоєглазова, І. Печонкін, Ю. Лапа // Технічні науки та технології. 2017. № 1 (7). С. 225–233.
3. Донцова А.Е. Стекло с управляемой прозрачностью (smart window) в гражданском строительстве / А.Е. Донцова, А.В. Калинина // Alfabuild. 2018. № 4. С. 73-82.
4. Електронна науково-технічна база з питань енергосбереження, інвестиційних і інноваційних проєктів.
5. Steve DeBusk. A Review and Examination of EnerLogic™ Window Film Performance Claims. / 8p. // <http://www.luxivision.dk/assets/EnerLogic-White-Paper>
6. Solutia Launches Industry-Changing EnerLogicR /70 Low-E Window Film. Jan. 25, 2012. URL: http://www.eastman.com/Company/About_Eastman/History/2012/Pages/Solutia_Launches_Industry_Changing_EnerLogic_70Low_EWindow_Film.aspx
7. Агаджанов М. КПД частинно прозорих окон с солнечными батареями превысил 11% / М.Агаджанов / Хабр. 2017. URL: <https://habr.com/ru/post/408789/>
8. Hui Huang et al. Solvothermal synthesis of Sb:SnO₂ nanoparticles and IR shielding coating for smart window / *Materials & Design* (2015). // DOI: [10.1016/j.matdes.2015.09.013](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.013)
9. Авельсник Н. SolarWindow навчили звичайні вікна виробляти електроенергію // Хайтек. 2016. URL: https://hightech.fm/2016/09/02/solar_window
10. Jingwen Xu et al. "Electrochromic-Tuned Plasmonics for Photothermal Sterile Window." // *ACS Nano*. 2018 // DOI: [10.1021/acs.nano.8b02292](https://doi.org/10.1021/acs.nano.8b02292)
11. Joseph Murray et al. Electrically Controllable Light Trapping for Self-Powered Switchable Solar Windows // *ACS Photonics* (2016). // DOI: [10.1021/acsphotonics.6b00518](https://doi.org/10.1021/acsphotonics.6b00518)
12. SolarGaps: жалюзі з сонячними батареями забезпечать квартиру безкоштовної електроенергією. / Екотехніка. 2016. URL: <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/1188-solargaps-zhalyuzy-s-solnechnymi-batareyami-obespechat-kvartiru-besplatnoj-elektroenergiej.html>
13. Коваль О.В., Мурзін А.В., Наумець І.І. Застосування монохромного Смарт-скла при проєктуванні закладів готельного господарства. // Современная научная идея. 2017. 7с. URL: www.sworld.com.ua.
14. Закируллин Р. С. Перспективы применения Смарт – окон в архитектуре и

строительстве. 8с. URL: <http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/1105/1/368-375.pdf>

15. Ruben Baetens, Bjorn Petter Jelle, Arild Gustavsen. Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings // State-of-the-Art. 2010. 29 p. URL: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2436360/Properties+Requirement+s+and+Possibilities+of+Smart+Windows+for+Dynamic+Daylight+and+Solar+Energy+Control+in+Buildings+-+State-of-the-Art+-+Article++Submitted+Version.pdf?sequence=3>

16. Marco Casini. Smart windows for energy efficiency of buildings. 2017. p.273–281. URL: <https://afterglass.ca/wp-content/uploads/2017/08/energy-report.pdf>

References:

1. Lobovku, A.V. (2018). Enerhozberihayuchi vikonni systemy: stan, tendentsiyi ta perspektyvy. *Molodyy vchenyy*. № 18 (204), pp. 75-80. URL: <https://moluch.ru/archive/204/49863/>

2. Lapa, M., Dvoyehlazova, M., Pechonkin, I., Lapa, Yu. (2017). Zabezpechennya enerhoefektyvnosti budivel'. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohiyi*. № 1 (7), pp. 225–233.

3. Dontsova, A.E., Kalynyna, A.V. (2018). Steklo s upravlyaemoy prozrachnost'yu (smart window) v hrazhdanskom stroitel'stve. *Alfabuild*. № 4, pp. 73-82.

4. Elektronna naukovo-tekhnichna baza z pytan' enerhosbrezhennya, investytsiynykh i innovatsiynykh proektiv.

5. Steve DeBusk. A Review and Examination of EnerLogic™ Window Film Performance Claims. 8p. URL: <http://www.luxivision.dk/assets/EnerLogic-White-Paper>

6. Solutia Launches Industry-Changing EnerLogicR /70 Low-E Window Film. URL: http://www.eastman.com/Company/About_Eastman/History/2012/Pages/Solutia_Launches_Industry_Changing_EnerLogic_70Low_EWindow_Film.aspx

7. Ahadzhanov, M. (2017). KPD chastychno prozrachnykh okon s solnechnymy batareyamy prevysyl 11% URL: <https://habr.com/ru/post/408789/>

8. Hui Huang et al. (2015) Solvothermal synthesis of Sb:SnO₂ nanoparticles and IR shielding coating for smart window. *Materials & Design*. DOI: 10.1016/j.matdes.2015.09.013]

9. Avel'snyk, N. (2016). SolarWindow navchyly zvychnayni vikna vyroblyaty elektroenerhiyu. URL: https://hightech.fm/2016/09/02/solar_window

10. Jingwen Xu et al. (2018). "Electrochromic-Tuned Plasmonics for Photothermal Sterile Window." *ACS Nano*. DOI: 10.1021/acsnano.8b02292]

11. Joseph Murray et al. (2016) Electrically Controllable Light Trapping for Self-Powered Switchable Solar Windows. *ACS Photonics*. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00518]

12. SolarGaps: zhalyuzi z sonyachnymy batareyamy zabezpechat' kvartyru bezkoshtovnoyi elektroenerhiyevu. (2016). *Ekotekhnika*. URL: <https://ecotekhnika.com.ua/energy/solntse/1188-solargaps-zhalyuzi-s-solnechnymi-batareyami-obespechat-kvartiru-besplatnoi-elektroenergiej.html>

13. Koval', O.V., Murzin, A.V., Naumets', I.I. (2017) Zastosuvannya monokhromnoho Smart-skla pry proektuvanni zakladiv hotel'noho hospodarstva. *Sovremennaya nauchnaya ydeya*. URL: www.sworld.com.ua.

14. Zakyryullyn, R.S. Perspektivy pryimenenyya Smart – okon v arkhitekture y stroitel'stve. URL: <http://elib.osu.ru/bitstream/123456789/1105/1/368-375.pdf>

15. Ruben Baetens, Bjorn Petter Jelle, Arild Gustavsen (2010).. Properties, Requirements and Possibilities of Smart Windows for Dynamic Daylight and Solar Energy Control in Buildings. *State-of-the-Art*. URL: <https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/2436360/Properties+Requirement+s+and+Possibilities+of+Smart+Windows+for+Dynamic+Daylight+and+Solar+Energy+Control+in+Buildings+-+State-of-the-Art+-+Article+-+Submitted+Version.pdf?sequence=3>
16. Marco Casini (2017). Smart windows for energy efficiency of buildings. Pp. 273–281. URL: <https://afterglass.ca/wp-content/uploads/2017/08/energy-report.pdf>

Ю.С. Рябинина, Т.Ю. Цифра

Енергозберігаючі оконні системи: види, розвиток, порівняння і перспективи

Тенденція використання природних ископаємих зменшується на перші позиції виходять енергозбереження і екосистеми. Тому використання скляної обробки будівель стало отправною точкою в пошуку нових технологій збереження використання електроенергії, зменшення потребностей в кондиціонуванні і додатковому освітленні. Розроблене смарт-скло є вдосконалим типом скла, яке може змінювати прозорість в залежності від різних умов, або переробляти сонячний світ в електроенергію, якою можна користуватися на потреби людини. В роботі досліджується поява перших видів смарт-окон, і подальші розробки смарт-окон з використанням різних плівок, хімічних і органічних сполучень. Перспективність використання розумного скла для збільшення природного освітлення в різних сферах і будівлях можливої зв'язаних технологій методами порівняння декількох видів смарт-скла. Приведені основні види смарт-окон: фотохромні вікна, термохромні вікна, електрохромні вікна, жидкокристалічні вікна, вікна на основі взвешених частинок, вікна з використанням «теплового дзеркала». На основі викладеної характеристики різних технологій смарт-скла виявлено його переваги і недоліки, а також зв'язані з ними складності, які в перспективі повинні бути розв'язані. Складена класифікація смарт-окон за типом використання в них плівок, їх переваги і недоліки використання. Описуються основні новітні технології поглинання сонячного світла поверхнею вікна, і конвертацією світла в електроенергію, проблематика досягнення прозорості скла, і тенденція рішення цього питання. На конкретних прикладах розглянуті області застосування скла з управляємою прозорістю, і отримані економічні показники при його використанні в будівлях. Розглянута технологія використання сонячних батарей в вигляді жалюзі і їх вплив на забезпечення будівлі енергією. Встановлено, що з розвитком техніки і технології виробництва смарт-скла відбулося покращення деяких його оптичних властивостей, сприяло зменшенню його вартості, що веде до збільшення доступності даного матеріалу.

Ключові слова: енергоефективність, смарт-вікна, оброблені вікна, електроенергія, кондиціонування, розумне скло, будівельні технології.

Yu.S. Riabinina, T.Yu. Tsyfra

Energy-saving window systems: types, development, comparisons and perspectives

The tendency to use natural resources is decreasing; energy conservation and ecosystems are taking the first positions. Therefore, the use of glass finishing of buildings has become a starting point in the search for new technologies to save energy use, reduce the need for air conditioning and additional lighting. The developed smart glass is an advanced type of glass that can change transparency depending on different conditions, or convert sunlight into electricity that can be used for human needs. The work examines the appearance of the first types of smart windows, and further development of smart windows using various films, chemical and organic compounds. The prospect of using smart glass to improve natural lighting in various fields and the future possibilities of related technologies by comparing several types of smart glass. The main types of smart windows are presented: photochromic window, thermochromic window, electrochromic window, liquid crystal windows, windows based on suspended particles, window using a "thermal mirror". On the basis of the given characteristics of various technologies of smart glass, its advantages and disadvantages, as well as the associated difficulties, which should be resolved in the future, are revealed. The existing classification of smart windows by the type of use of films in them and their advantages and disadvantages of using. The main newest technologies of absorption of sunlight by the surface of the window and the conversion of light into electricity, the problem of achieving transparency by glass, and the tendency of solving this issue are described. On specific examples, the areas of application of glass with controlled transparency are considered, and the economic indicators obtained when it is used in buildings. The technology of using solar panels in the form of blinds and their influence on providing the building with energy is considered. improvement of some of its optical properties, contributed to a decrease in its cost, which leads to an increase in the availability of this material.

Key words: energy efficiency, smart windows, decorative fences, electricity, air conditioning, smart glass, building technologies.

Посилання на статтю

APA: Riabinina, Yu.S. & Tsyfra, T.Yu. (2020). Energy-saving window systems: types, development, comparisons and perspectives. *Shliakhy pidvyshchennia efektyvnosti budivnytstva v umovakh formuvannia rynkovykh vidnosyn*, 45, 57-70.

ДСТУ: Рябініна Ю.С. Енергозберігаючі віконні системи: види, розвиток, порівняння та перспективи [Текст] / Ю.С. Рябініна, Т.Ю. Цифра // Шляхи підвищення ефективності будівництва в умовах формування ринкових відносин. – 2020. – № 45. – 57-70.