

УДК 621.763

**Р.Й.Мусій**, канд.хім.наук (Ін-т фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М.Литвиненка НАН України, Львів),  
**С.М.Хайрнатов**, канд.техн.наук (Національний технічний ун-т України, "КПІ", Київ),  
**І.В.Семенюк**, канд.техн.наук (ВАТ "УНДІПП ім. Т.Г.Шевченка", Львів),  
**В.П.Гальчак**, канд.техн.наук, **С.В.Сиротюк**, канд.техн.наук (Львівський національний аграрний ун-т, Львів)

## Розробка та дослідження вітчизняних ефективних покриттів для поглинаючої поверхні сонячних теплових колекторів

*У статті розглянуто новий підхід в отриманні ефективного покриття для сприймаючої поверхні сонячного колектора методом золь-гель технології. Наведені результати двох незалежних досліджень – як при опроміненні потоком природної сонячної радіації, так і на вимірювальному стенді з імітатором сонячного спектра – показали, що розроблене покриття за своєю ефективністю не поступається відомому селективному покриттю фірми SunSelect (Німеччина).*

*В статье рассматривается новый подход в получении эффективного покрытия для воспринимающей поверхности солнечного коллектора методом золь-гель технологии. Приведенные результаты двух независимых сравнительных исследований – как при облучении потоком природной солнечной радиации, так и на измерительном стенде с имитатором солнечного спектра – показали, что разработанное покрытие по своей эффективности не уступает известному селективному покрытию фирмы SunSelect (Германия).*

**Вступ.** За фактичної відсутності державних механізмів стимулювання, основним стримуючим фактором для широкого впровадження сонячних систем теплопостачання є їх висока вартість. За результатами аналізу ринкових пропозицій комплектуючих геліосистем найбільший вклад у структуру ціни вноситься сонячними колекторами. Згідно матеріалів, отриманих із доступних джерел інформації [1, 2], в конструкціях плоских теплових сонячних колекторів використовуються готові вискоефективні селективні покриття сприймаючої поверхні, проте – іноземного виробництва. Вони відзначаються високим коефіцієнтом поглинання сонячних променів  $\alpha$  в короткохвильовій області з інтервалом довжин хвиль  $\lambda = 0,34 \div 2,50$  мкм і незначним коефіцієнтом випромінювання  $\varepsilon$  у довгохвильовій області  $\lambda > 3,0$  мкм. Такі покриття отримують із використанням складних технологій вакуумного напилення і відповідно їх вартість є високою.

Режими роботи сонячних установок гарячого водопостачання, як показує практика впровадження, переважно далекі від оптимальних, що нівелює переваги використання у колекторах високоселективних покриттів. Натомість видається

доцільнішим використання колекторів із дещо гіршими параметрами засвоєння сонячної енергії, проте набагато дешевшими покриттями. Такі колектори можуть зайняти сегмент ринку, який пропонує сонячні технології для масового використання, наприклад, у комунально-побутовій сфері, індивідуальних фермерських господарствах, туристичному бізнесі тощо.

**Розробка покриттів.** Авторами запропоновано вискоефективні покриття нового типу з доступних у нашій країні матеріалів. Дослідні зразки з вуглецево-кремнієвого композиту, одержаного методом золь-гель технології, виготовлено у Львівському відділенні фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л.М.Литвиненка НАН України. Золь-гель метод [3, 4] є простим і зручним для одержання гібридних органо-неорганічних матеріалів, які мають у поверхневому шарі функціональні групи. Це дозволяє створювати матеріали з наперед заданими об'ємними та поверхневими властивостями.

Перспективні типи покриттів для сонячних колекторів розроблено на основі тетраетоксисилану, метилтриметоксисилану та різних органічних і неорганічних добавок. Контролювалась

концентрація компонентів, в'язкість розчинів, товщина покриттів та інші параметри. Покриття наносили на алюмінієві та мідні підкладки розмірами 40×40 мм методом *spin coating* та поливу пластин з подальшою сушкою при різних температурних режимах. Поверхню пластин попередньо промивали у водному миючому розчині, кислотній бані з використанням ультразвуку при 60°C, дистильованій воді і повільно висушували у сушильній шафі.

**Методика та результати дослідження.** Дослідження ефективності засвоєння сонячної енергії проводили відносним методом порівняння температури зразків розроблених покриттів із відомим селективним покриттям фірми *SunSelect* (Німеччина) у процесі їх радіаційного нагрівання. У лабораторії теплових труб НТУУ "Київський політехнічний інститут" дослідження проводили шляхом порівняння рівноважних температур зразків при одночасному опроміненні потоком природної сонячної радіації. Зразки поміщали в однакові теплоізольовані комірки, вирізані у пінопластовій плиті, розміщеній на освітленій сонцем південній стіні будинку. Для стабілізації досягнутої рівноважної температури усі комірки закривали зверху тонким полікарбонатним склом. За неперервного вимірювання рівноважна температура зразків змінювалася відповідно з умовами освітлення, що наближено відповідає режиму опромінювання сонячного колектора в реальних умовах експлуатації.

Температуру досліджуваних зразків вимірювали тонкими мідь-константовими термопарами з тильної сторони пластинок. Сигнали термопар реєстрували візуально за показами на табло модуля МВА8 з аналоговим входом і цифровим виходом виробництва фірми ОВЕН. Одночасно також вимірювали рівень сумарної сонячної радіації піранометром СРМ-3 фірми *Kipp&Zonen* (Нідерланди) з аналоговим виходом. Його сигнал перетворювали у цифровий температурним регулятором ТРМ202 фірми ОВЕН. Відтак запис та обробку вимірювальної інформації здійснювали персональним комп'ютером у неперервному режимі (рис. 1).

Досліджували декілька типів ефективних покриттів. Покриття зразків №1-4 отримані зольгель методом (співвідношення тетраетоксисилан:

метилтриметоксисилан 10:1 – зразки №1 і 2 та 5:1 – зразки №3 і 4; товщина зразків 1,5 мкм – №1 і 3 та 2,0 мкм – №2 і 4); зразок №5 – покриття отримане чорним анодуванням алюмінієвого сплаву АД31; зразок №6 – селективне покриття фірми *SunSelect* (Німеччина), яке виготовлене за типовою технологією вакуумного напилення.

Результати досліджень відображені на рис. 2. Як показують наведені дані, зразок №4 за своєю інтегральною характеристикою – ефективністю засвоєння сонячної енергії – практично не поступається зразку №6 німецького виробництва.

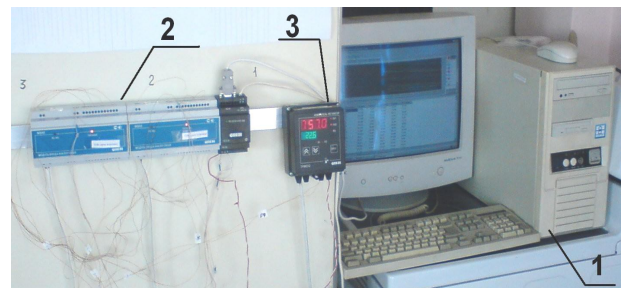


Рис. 1. Стенд для порівняльних досліджень ефективності покриття: 1 – ПК; 2 – вимірювальний прилад МВА8; 3 – вимірювальний прилад ТРМ202.

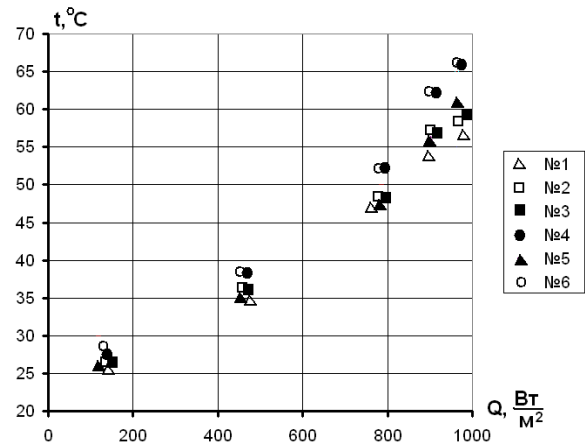


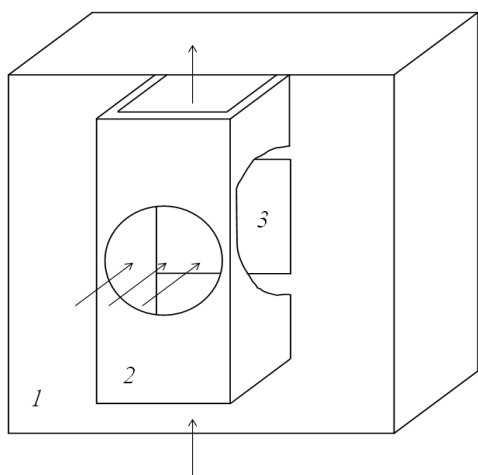
Рис. 2. Залежність температури зразків з ефективними покриттями від щільності сонячного теплового потоку.

У лабораторії відновлюваної енергетики Львівського національного аграрного університету проводили порівняльні дослідження ефективності покриттів на стенді з імітатором неперервного сонячного спектра. У якості джерела світла використовували галогенні лампи з алюмінієвим відбивачем і температурою нитки розжарювання близько 2900°C з живленням стабілізованою напругою 220 В.

Максимум інтенсивності спектра випромінювання галогенних ламп випадає на довжину хвилі 0,90 мкм проти 0,55 мкм у природного сонячного

світла. Незважаючи на неповну відповідність спектрів, фізичні механізми поглинання променевої енергії Сонця та галогенної лампи розжарювання практично однакові. Тому при порівняльних дослідженнях заміна сонячного випромінювання штучним однакової інтегральної інтенсивності також істотно не впливає на режими енергетичних перетворень опромінюваних зразків [5, 6]. Відтак результати порівняння інтегральних параметрів зразків – швидкість нагрівання і рівноважна температура – залишаються практично незмінними для обох типів випромінювачів.

На рис. 3 показано схему вимірювального стенду, в якій досліджуваний зразок поміщено всередину прямокутного жолоба для створення потоку охолоджуваного повітря при нагріванні. Галогенна лампа розжарювання споживаючою потужністю 50 Вт з концентрованим пучком розбіжністю 40° на віддалі 20-25 см утворює світлову пляму діаметром близько 10 см практично рівномірної енергетичної освітленості у 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Діафрагмуванням із плями виділяється ділянка, що вписується у розміри досліджуваного зразка. Енергетичну освітленість у зоні опромінювання контролюють стандартним піранометром М-115М.



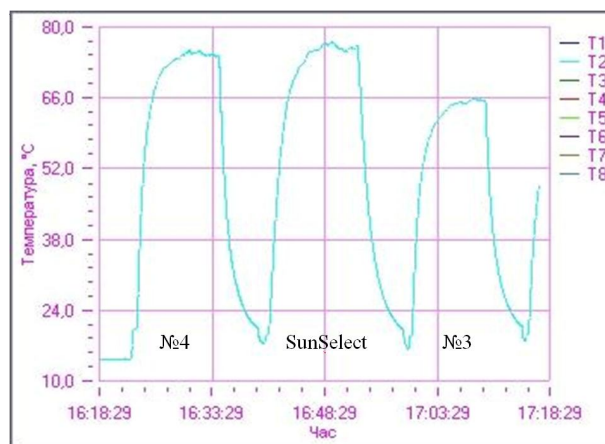
**Рис. 3. Схема стенду для дослідження ефективності покриттів:** 1 – теплоізоляційна плита; 2 – вентиляційний жолоб із отвором для діафрагмування променів; 3 – досліджуваний зразок.

Температуру зразків контролювали тонкою стандартною ХА-термопарою, притиснутою до тильної сторони пластин. Вимірювання проводили у режимі посекундного сканування температури стандартним регулятором-вимірювачем РТ-0102 виробництва НВО "Термоприлад" з абсолютною похибкою вимірювання 0,5°С, візуаль-

ною індикацією на передній панелі та цифровим виходом на персональний комп'ютер. Вимірювання припиняли після досягнення зразками рівноважної температури, яку фіксували візуально на екрані монітора за графічною залежністю у процесі радіаційного нагрівання.

На рис. 4 співставлено криві нагрівання і охолодження покриття *SunSelect* на мідній підкладці (середня крива) з двома зразками експериментального покриття, нанесеного на алюмінієві підкладки. Різниця матеріалів підкладок впливає лише на швидкість нагрівання, тоді як рівноважна температура залежить від співвідношення потужностей опромінювання і тепловідводу. Процес охолодження має дві складові тепловтрати: конвекційну (за рахунок потоку повітря) та радіаційну (через випромінювання у довгохвильовому діапазоні). Тому тепловтрати залежать лише від теплофізичних властивостей покриття, оскільки зразки притискаються до теплоізоляційної плити тильною стороною металевої підкладки.

На рис. 4 наведено графічні залежності процесів нагрівання і охолодження трьох зразків із найбільшою різницею рівноважних температур при освітленні імітатором неперервного сонячного спектра. У цій серії вимірювань найближчу температуру до еталонного зразка також має зразок №4, як і при опроміненні потоком природної сонячної радіації (рис. 2). Причому за стабільного потоку випромінювання галогенною лампою рівноважна температура фіксується з вищою надійністю.



**Рис. 4. Результати порівняння температурних параметрів зразків покриття.**

З метою пояснення меншої ефективності за своєю сонячної енергії зразком №4 було додатково досліджено спектральну залежність коефіціє-

ента поглинання його покриття, попередньо нанесеного тонким напівпрозорим шаром на плоску кварцову підкладку. За результатами дослідження, проведеного у спектральній лабораторії, в області довжин  $\lambda \approx 1,8 \div 2,0$  мкм спостерігається смуга зменшеного поглинання, як це показано на рис. 5. Саме цим найбільш імовірно пояснити зменшення рівноважної температури досліджуваного покриття відносно *SunSelect*, прийнятого у якості зразкового.

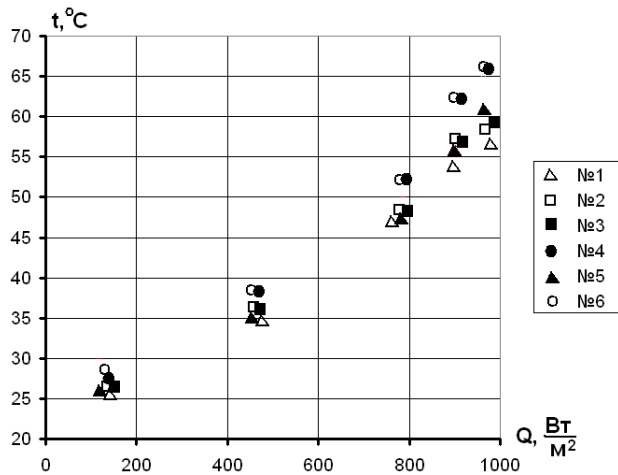


Рис. 5. Спектральна залежність коефіцієнта поглинання покриття зразка №4.

**Висновки.** 1. Розроблено ефективні покриття для сприймаючої поверхні сонячних теплових колекторів із використанням золь-гель методу.

2. На підставі порівняльних досліджень підтверджено, що розроблені покриття не поступаються за ефективністю засвоєння сонячної енергії відомому селективному покриттю фірми *SunSelect* (Німеччина).

3. Порівняння високої ефективності розроблених покриттів підтверджується результатами двох незалежних вимірювань, як при опроміненні потоком природної сонячної радіації, так і на вимірювальному стенді з імітатором сонячного спектра.

4. Для постановки питання про можливість заміни вартісних імпортних покриттів дешевими вітчизняними, які виготовлені за методом золь-гель технології, необхідно продовжити ресурсні випробування зразків.

1. ISO/CD 12592.2; "Solar Energy-Materials for Flat Plate Collectors – Qualification test procedures for Solar Absorber Surface Durability", January 9 th, 1997.

2. Ore<sup>l</sup> B., Spreizer<sup>l</sup> H., Šurca Vuk<sup>l</sup> A., Fir<sup>l</sup> M., Merlini<sup>b</sup> D., Vodlan<sup>b</sup> M. and Köhl M. Selective paint coatings for coloured solar absorbers: Polyurethane thickness insensitive spectrally selective (TISS) paints (Part II) // Solar Energy Materials and Solar Cells. – Vol. 91. – 2007. – P. 108–119.

3. Мусій П.Й., Рассмакін Б.М., Хайрмасов С.М., Семениук І.В., Боярчук В.М., Сиротюк В.М., Сиротюк С.В., Гальчак В.П. Розробка та дослідження вітчизняних селективних покриттів, одержаних золь-гель методом / 10-а Міжн. наук.практ. конференція "Відновлювана енергетика XXI століття", 14-18 вересня 2009, Крим. – С. 171–174.

4. Нанокмпозиционные оксидные и гибридные органико-неорганические материалы, получаемые золь-гель методом. Синтез. Свойства. Применение. О.А. Шилова, В.В. Шилов // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. – 2003. – Т. 1. – № 1. – С. 9–83.

5. Моделирование тепловых режимов космического аппарата и окружающей среды. / Под ред Г.И. Петрова. – М.: Машиностроение, 1971. – 382 с.

6. Вугман С.М., Волков В.И. Галогенные лампы накаливания. – М.: Энергия, 1980. – 136 с.