

$$q_{суш} = (q_{нагр} + q_{вип} + q_{оо})\kappa, \text{ кДж/кг}, \quad (1)$$

де:  $\kappa$  – невраховані витрати теплоти в процесі сушіння, приймають  $\kappa=1,15$ ;  $q_{нагр}$  – питомі витрати теплоти на початкове нагрівання деревини, які визначаються за формулою

$$q_{нагр} = \frac{\rho C \Delta t}{m_{1м3}}, \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

де:  $\rho$  – густина деревини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C$  – питома теплоємність деревини,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $\Delta t$  – різниця температур на яку нагрівають деревину від початку до кінця процесу нагрівання,  $^\circ\text{C}$ ;  $m_{1м3}$  – маса вологи, що виділяється з  $1\text{м}^3$  деревини під час сушіння.

$$m_{1м3} = \rho_y \frac{W_n - W_k}{100}, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

де:  $\rho_y$  – умовна густина деревини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W_n, W_k$  – відповідно початкова і кінцева вологість деревини після сушіння, % абс;  $q_{вип}$  – питомі втрати теплоти на випаровування вологи з деревини, які визначаються за формулою

$$q_{вип} = 1000 \times \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0} - C_{\theta t_m}, \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

де:  $I_2, I_0$  – відповідно ентальпія агента сушіння на виході від матеріалу та свіжого повітря,  $\text{кДж/кг}$ ;  $d_2, d_0$  – відповідно вологовміст агента сушіння на виході від матеріалу та свіжого повітря,  $\text{г/кг}$ ;  $C_{\theta}$  – теплоємність води,  $C_{\theta}=4,19$ ,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $t_m$  – температура матеріалу,  $^\circ\text{C}$ ;

$$q_{оо} = \sum F_{оо} K_{оо} (t_k - t_0) / m_c, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

де:  $\sum F_{оо} K_{оо}$  – сума добутку площі окремого огороження на його коефіцієнт теплопередачі,  $\text{кДж}/(\text{с}\cdot^\circ\text{C})$ ;  $t_k, t_0$  – відповідно температура середовища в камері та зовнішнього повітря,  $^\circ\text{C}$ ;  $m_c$  – маса вологи, яка випаровується з деревини за одиницю часу,  $m_c = m_{1м3} / \tau_c$ ;  $\tau_c$  – тривалість сушіння, с.

Отримавши значення питомих витрат теплоти на випаровування  $1\text{кг}$  вологи, можна для будь-якої породи деревини, коли відома початкова і кінцева вологість деревини та ємність ( $E$ ) будь-якої сушильної установки, знайти кількість теплоти, яку потрібно витратити за один цикл сушіння, за формулою

$$Q = q_{суш} m_{1м3} E, \text{ кДж}. \quad (6)$$

Наприклад, для сушіння пиломатеріалу кількість теплоти становить  $Q=9,96 \cdot 10^5$  Дж, а середня теплова потужність для всього процесу буде становити  $N_Q=1,6$  кВт.

Таким чином, за кількісною оцінкою витрати теплоти можна порівнювати ефективність конвективного сушіння пиломатеріалів (заготовок), шпону та подрібненої деревини залежно від режимних параметрів, породи деревини та типу сушильної установки.

## Література

1. Білей П.В. Теоретичні основи теплової обробки і сушіння деревини / П.В. Білей. – Коломия : Вид-во "Вік", 2005. – 364 с.

2. Сергоский П.С. Гидротермическая обработка и консервирование древесины / П.С. Сергоский, А.И. Рассев. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1987. – 360 с.

3. Стерлин Д.М. Сушка в производстве фанеры и древесно-стружечных плит / Д.М. Стерлин. – М. : Изд-во "Лесн. пром-сть", 1976. – 38 с.

4. Білей П.В. Сушіння та захист деревини : підручник / П.В. Білей, В.М. Павлюст. – Львів : Вид-во "Кольорове небо", 2008. – 312 с.

5. Білей П.В. Установка для сушіння шпону / П.В. Білей, В.М. Павлюст, Б.І. Приставський // Патент на корисну модель № 66126 Бюл. № 24 від 26.12.2011.

6. Білей П.В., Павлюст В.М., Приставський Б.І. Агрегат теплової енергії сушильних установок для деревини / П.В. Білей, В.М. Павлюст, Б.І. Приставський // Патент на корисну модель № 65688 Бюл. № 23 від 12.12.2011.

## Білей П.В., Приставський Б.І. Анализ эффективности конвективной сушки древесины

Рассмотрена эффективность использования разных агентов сушения (топочных газов и атмосферного воздуха) в процессе конвективного сушения пиломатериалов, шпон и измельченной древесины. Описана методика определения удельных расходов теплоты на испарение  $1\text{кг}$  влаги, по которым можно обосновать эффективность процесса сушения.

**Ключевые слова:** удельная затрата теплоты, нагревание, испарение, древесина, влажность, температура, удельная теплоемкость, эффективность.

## Bilej P.V., Pristavskyy B.I. Efficiency analysis of convective wood-drying

Efficiency of the use of different agents of drying (fire-box gases and atmospheric air) is considered in the process of the convective drying of saw-timbers, lead and the ground up wood. The method of determination of specific charges of warmth is described on evaporation  $1\text{kg}$  of moisture, after which it is possible to ground efficiency of process of drying.

**Keywords:** specific expense of warmth, heating, evaporation, wood, humidity, temperature, specific heat capacity, efficiency.

УДК 662.997

Доц. В.М. Желих<sup>1</sup>, канд. техн. наук;  
проф. Б.Р. Ціж<sup>2</sup>, д-р техн. наук; аспір. Б.І. Пізнак<sup>1</sup>

## ОПТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛІМЕРНИХ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Подано результати досліджень оптичних характеристик полімерного сонячного колектора на основі стільникової полікарбонатної плити. Визначено вплив різних видів теплоносія і конструкцій полімерних сонячних колекторів на ефективність їхнього світлопропускання та світлопоглинання при зміні довжини хвилі випромінювання.

**Ключові слова:** сонячний колектор, теплоносій, коефіцієнт світлопропускання, довжина хвилі, стільниковий полікарбонат.

**Актуальність роботи.** Важливість сонячної енергетики було недооцінено протягом тривалого часу, але у зв'язку з підвищенням цін на енергоносії, їх майбутнім дефіцитом і розвитком сонячних технологій, у найближчому майбутньому можна передбачити поширення використання енергії сонця. За оцінками німецької промислової групи "Bundesverband Solarwirtschaft", очі-

<sup>1</sup> НУ "Львівська політехніка";

<sup>2</sup> Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій ім. С.З. Гжицького

кується збільшення частки поновлюваних джерел енергії для гарячого водопостачання та опалення. Геліосистеми призначені для забезпечення гарячою водою в теплий і перехідний періоди року, що становить близько 60 % споживання теплової енергії. Використання сонячної енергії для отримання тепла є випробуваною і перевіреною технологією, що вже використовується протягом десятиліть. На рис. 1 показано зростання кількості встановлених колекторів на території США залежно від зростання ціни на нафту [1].

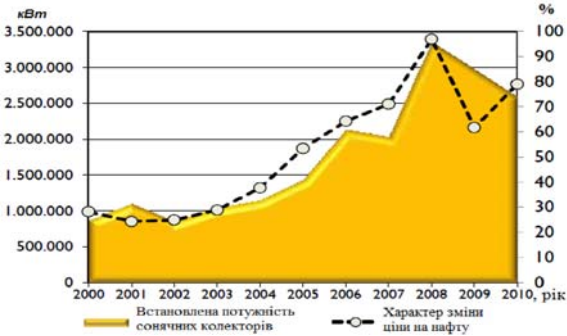


Рис. 1. Зіставлення теплової потужності встановлених сонячних колекторів у США залежно від коливання вартості нафти

Міжнародний ринок сонячних колекторів сильно прогресує в останні роки: особливо в Китаї, США та Європі, виготовлення та введення в експлуатацію геліоустановок швидко зростає. Однак дві основні проблеми, які обмежують використання сонячної енергії у великих масштабах: енергоємність і вартість технологій виготовлення сонячних колекторів. Основна частка встановлених у всьому світі сонячних колекторів складається із вакуумних і плоских. Обидва типи на цей час є трудомісткі і дорогі у виробництві та потребують різних видів матеріалів.

Найпоширенішим на сьогодні є використання мідних абсорберів для плоских сонячних колекторів. Вміст міді у поглинаючій пластині звичайного плоского колектора змінюється від 2 до 6 кг/м<sup>2</sup>. Оптимальна кількість міді, що використовується у трубках, у теплообмінниках та сонячних колекторах загалом, становить 5 кг/м<sup>2</sup>. Кожен квадратний метр колектора забезпечує 300 кВт·год/рік. Отже, для забезпечення 1 МВт·год/рік теплової енергії необхідно 16,5 кг міді. Таким чином, для заміни споживання традиційних енергоресурсів на 1 % енергією сонячного випромінювання необхідно 22 млн т міді, а щорічне виробництво міді у світі становить близько 15 млн т. Потреба у використанні нових матеріалів очевидна. Алюміній, сталь та інші метали будуть використовуватися більше, полімерні матеріали теж потрібно розглядати як альтернативу. Основними перевагами використання виробів із полімерів є: їх низька вартість, маса та собівартість продукції. Остання властивість є найважливішим фактором у виборі полімерних матеріалів, оскільки вони можуть виготовлятися через лиття під тиском або екструзією.

Полімери можуть відігравати важливу роль у подальшому розвитку використання сонячної енергії. Їх застосування потенційно знизить вартість

виготовлення сонячних колекторів, полегшить обробку, зменшить масу і покращить дизайн порівняно з матеріалами, що використовуються на цей час.

Важливим завданням є розроблення термосифонних сонячних теплових систем на основі полімерних плоских колекторів, які призначені для інтеграції в оболонку будівлі. Нові полімерні матеріали і їх застосування в сонячних теплових системах визнають ключовими технологіями для розвитку сонячної теплової промисловості. З'являються додаткові ринки збуту для сонячних колекторів, які можуть виконувати функції конструктивних елементів зовнішніх захищень будівель.

**Мета та задачі досліджень.** Оцінити можливість використання полімерних матеріалів як основи для нових конструкцій сонячних колекторів. Встановити вплив теплоносія на оптичні характеристики полімерного СК.

**Постановка задачі.** Полімерні матеріали для використання їх у конструкції сонячних колекторів повинні відповідати низці вимог: матеріали світлопрозорого захищення мають протистояти тривалому сонячному ультрафіолетовому випромінюванню; мати високий коефіцієнт світлопропускання і протистояти механічним впливам навколишнього середовища; абсорбер повинен витримувати дію підвищених температур і робочого тиску теплоносія. Як матеріал, придатний до використання в конструкції сонячних колекторів, найчастіше обирають полікарбонат.

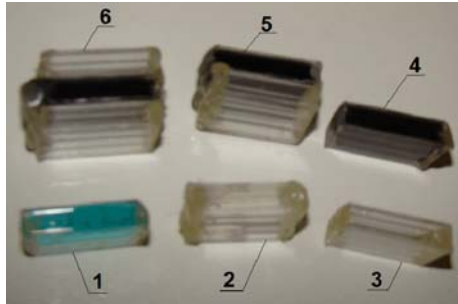
Стільникові полікарбонатні панелі мають високий коефіцієнт світлопропускання (83-90 %) залежно від товщини листа і зберігають свої властивості за температури від -40 °С до +120 °С.

Вони витримують значні вітрові та снігові навантаження, мають високу ударну міцність та низький клас горючості (Г-1). Сучасні полікарбонатні панелі виготовляють зі спеціальним покриттям, що запобігає потраплянню ультрафіолетового випромінювання усередину структури панелі. Ультрафіолетові промені, які є найбільш руйнівними, практично не проходять через ці захисні покриття. Мала питома вага зменшує вартість доставки, оброблення і монтажу цього матеріалу. З точки зору ефективності, найбільшою проблемою полімерних сонячних колекторів є те, що матеріал абсорбера є менш теплопровідним за метали. Однак це може бути компенсовано за рахунок оптимізації форми колектора.

Тепловий ККД сонячних колекторів тісно пов'язаний із ефективністю поглинача тепла. Це залежить не тільки від здатності поглинати сонячну енергію, але і від здатності передавати цю енергію до рідини теплоносія. Тому було запропоновано конструкцію полімерного сонячного колектора на основі прозорої тришарової стільникової плити і теплоносія – зафарбованої води. Оскільки плита полікарбонату є прозорою, то поглиначем тепла є сам теплоносій, що ліквідує проблему низької теплопровідності полімерів, а його вибір має вирішальне значення. До того ж, така конструкція сонячного колектора дає змогу легко вмонтувати його в зовнішні захищення будівель. Тому виникла потреба дослідити різні види теплоносія на світлопроникність.

Для проведення досліджень оптичних характеристик запропонованої конструкції сонячного колектора було підготовано зразки з декількома вида-

ми теплоносія: водою, зафарбованою пігментним барвником; дистильованою водою та розчином тосолу (рис. 2).



**Рис. 2. Зразки для дослідження світлопропускання сонячних колекторів:**  
 1) одношаровий заповнений тосолом; 2) одношаровий заповнений дистильованою водою; 3) одношаровий заповнений повітрям; 4) одношаровий заповнений пігментним барвником; 5) двошаровий заповнений барвником; 6) тришаровий заповнений барвником

Зразки, які були наповнені водою, зафарбованою в чорний колір, було виготовлено трьох видів: одношаровий; двошаровий, у якому порожній шар слугує тепловою ізоляцією та тришаровий, у якому через внутрішній шар пропускається теплоносії, а зовнішні шари відповідно виконують роль світлопрозорого захислення та теплової ізоляції.

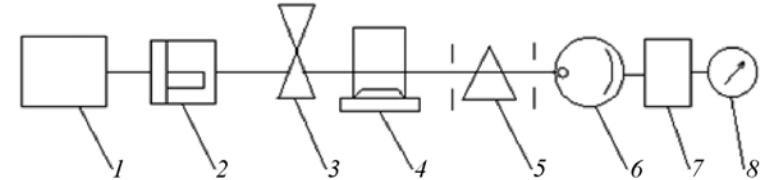
**Експериментальні дослідження.** Досліди проводили на спектрофотометрі Specord 400 (рис. 3) з робочим діапазоном довжини хвилі від 185 до 900 нм, оскільки у спектральній області менше ніж 200 нм відбувається інтенсивне поглинання світла киснем повітря. А довжина хвилі від 00 нм до 900 нм відповідає короткохвильовому інфрачервоному випромінюванню – саме воно становить тепловий спектр сонячного випромінювання і є визначальним у дослідженні сонячних колекторів.



**Рис. 3. Фото спектрофотометра Specord 400**

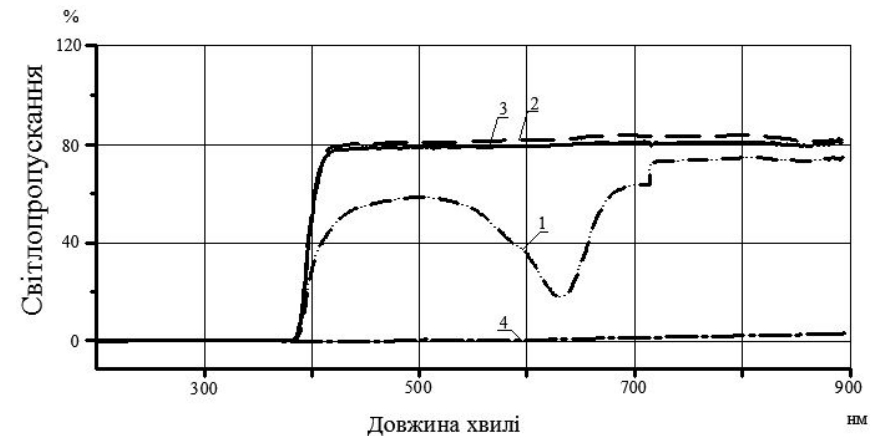
На рис. 4 зображено принципову схему роботи спектрофотометра. Джерело світла випромінює лінійний спектр, що містить потрібну лінію елемента, який визначається. В атомізаторі проба перетворюється в атомні пари, що поглинають світло відповідної довжини хвилі. Внаслідок атомного поглинання початкова інтенсивність випромінювання ( $I_0$ ) зменшується до інтен-

сивності світла, що пройшло крізь досліджуваний зразок (I). Монохроматор виділяє вузьку спектральну смугу (0,2...2 нм), у якій знаходиться вимірювана спектральна лінія елемента, що визначається. Детектор перетворює світловий потік в електричний сигнал, що обробляється у реєстровому пристрої так, щоб на виході атомно-абсорбційного спектрометра реєструвалася величина поглинання. Реєстровий пристрій синхронізований з модулятором і реагує лише на періодичний сигнал джерела. Таким способом унеможливлений вплив випромінювання атомізатора – воно постійне.



**Рис. 4. Принципова схема спектрофотометра:**  
 1) джерело живлення; 2) джерело світла; 3) модулятор; 4) атомізатор; 5) монохроматор; 6) детектор; 7) підсилювач; 8) показуючий пристрій

Проводили дослідження експериментальних зразків на світлопропускання і світлопоглинання залежно від довжини хвилі. Для того, щоб визначити, які спектри будуть отримані, досліджували світлопропускання крізь комірку, яка складається з полікарбонатної плити, у сотах якої знаходиться розчин світлопоглинаючої речовини. Результати експериментів зображено графічно на рис. 5 і 6 відповідно.



**Рис. 5. Світлопропускання зразків від довжини хвилі:** 1) одношаровий заповнений тосолом; 2) одношаровий заповнений дистильованою водою; 3) одношаровий порожній; 4) одношаровий заповнений пігментним барвником

З рис. 5 можна побачити, що для усіх зразків світлопропускання до 380 нм є однаковим – це означає, що в цьому спектрі сонячне світло практично повністю поглинається полікарбонатом; а від 380 до 900 нм полікарбонат пропускає 82-85 % сонячного випромінювання. Якщо порівняти зразок 2 і 3,

то можна побачити що зразок, заповнений дистильованою водою, пропускає більше світла, ніж заповнений повітрям. Це пояснюється заломленням світла при проходженні крізь воду. Розчин тосолу пропускає значно більше світла, ніж пігментний барвник, хоча на проміжку від 600 до 650 нм його світлопропускання становить лише 20 %. Найбільш ефективним з точки зору поглинання виявився розчин пігментного барвника, який пропускає лише 5 % сонячного випромінювання по всій довжині хвилі.

Оскільки світлопропускання зразків заповнених пігментним барвником високе, то лінії світлопропускання знаходяться близько одна від одної і необхідні додаткові дослідження, щоб порівняти властивості цих зразків. Три зразки, заповнені розчином пігментного барвника: одношаровий, двошаровий і тришаровий, досліджували на світлопоглинання, результати дослідів наведено на рис. 6. Ступінь поглинання світла характеризується оптичною густиною (A), що реалізується такою формулою Ламберта – Бугера – Бера [1]:

$$A = \lg \left( \frac{I_0}{I} \right), \quad (1)$$

де:  $I_0$  – початкова інтенсивність випромінювання;  $I$  – інтенсивність світла, що пройшло крізь досліджуваний зразок.

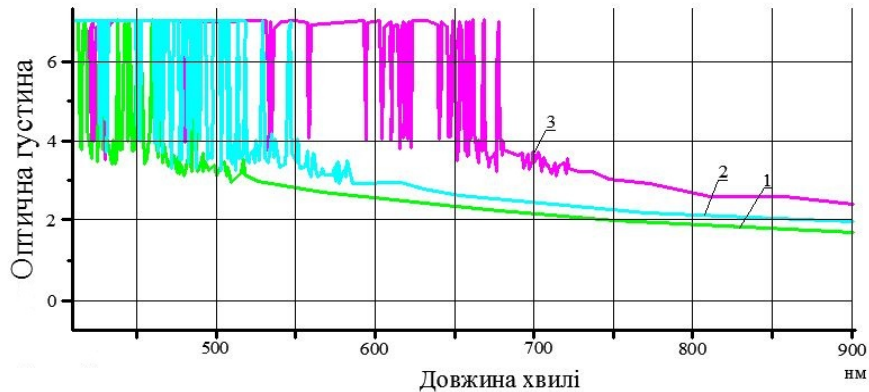


Рис. 6. Світлопоглинання зразків залежно від довжини хвилі: 1) одношаровий заповнений барвником; 2) двошаровий заповнений барвником; 3) тришаровий заповнений барвником

Згідно з отриманими результатами, всі три зразки мають високі показники світлопоглинання у всьому досліджуваному спектрі довжини хвилі. Але тришарова конструкція є більш ефективною з точки зору стійкості до тепловтрат сонячного колектора, оскільки зовнішні її шари запобігають втратам теплоти, саме тому було запропоновано сонячний колектор на основі тришарової полікарбонатної плити (рис. 7). У ньому верхній шар виконує роль світлопрозорого захислення, через середній шар проходить теплоносій – розчин пігментного барвника і він слугує абсорбером, а нижній шар виконує роль теплової ізоляції.

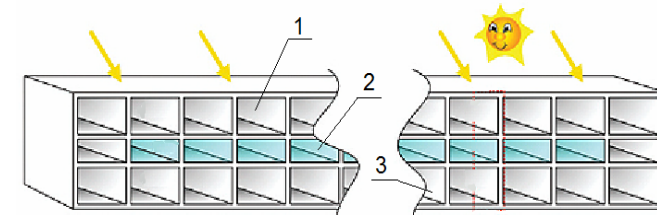


Рис. 7. Конструкція сонячного колектора на основі тришарового стільникового полікарбонатного листа: 1) шар, який виконує роль світлопрозорого захислення; 2) шар заповнений теплоносій; 3) шар, що виконує роль теплової ізоляції

**Висновки.** Встановлено графічні залежності коефіцієнта світлопропускання полімерного сонячного колектора від довжини хвилі сонячного проміння. Досліджено, що сонячні колектори на основі полімерних матеріалів із теплоносій, який виконує роль поглинача теплоти, можуть ефективно поглинати сонячне випромінювання у досліджуваному діапазоні довжини хвиль. Досліджено оптичні характеристики розчину пігментного барвника як поглинача сонячного випромінювання, встановлено що ступінь його світлопоглинання становить 95 %. Визначено ефективну конструкцію полімерного сонячного колектора на основі тришарової полікарбонатної плити.

### Література

1. Kohl Michael. Durability of polymeric glazing materials for solar applications / Michael Kohl etc. // Solar Energy. – 2005. – № 79. – Pp. 618-623.
2. Kohl Michael. Polymeric materials for solar thermal applications / Michael Köhl / 2nd Draft for the 58th meeting of the Executive Committee, December 2005 in Sydney, Australia.
3. Дорошенко О.В. Концепція розвитку сонячних термічних перетворювачів із полімерних матеріалів / О.В. Дорошенко, В.В. Костенюк. – Одеса : Вид-во ОДАХ. – 236 с.
4. Желих В. Сонячний колектор / В. Желих, Б. Пізнак, А. Фечан // Патент на корисну модель № 55948 Бюл. № 22 від 26.12.2010
5. Возняк О.Т. Основи наукових досліджень у будівництві / О.Т. Возняк, В.М. Желих. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка", 2003. – 173 с.

### Желих В.М., Циж Б.Р., Пізнак Б.И. Оптические характеристики полимерных солнечных коллекторов

Представлены результаты исследований оптических характеристик полимерного солнечного коллектора на основе сотовой поликарбонатной плиты. Определено влияние различных видов теплоносителя и конструкций полимерных солнечных коллекторов на эффективность их светопропускания и светопоглощения при изменении длины волны излучения.

**Ключевые слова:** солнечный коллектор, теплоноситель, коэффициент светопропускания, длина волны, сотовый поликарбонат.

### Zhelykh V.M., Cizh B.R., Piznak B.I. Optical characteristics of polymer solar collectors

The results of studies of the optical characteristics of proposed polymer solar collector based on the honeycomb polycarbonate plates are given. The influence of different types of coolant and designs of polymer solar collectors on their light transmission efficiency by changing the wavelength of radiation.

**Keywords:** solar collector, coolant, light transmission coefficient, wavelength, cellular polycarbonate.