

УДК 536.248.2:532.529.5

*Дорошенко А. В.<sup>1</sup>, Джамал Камал Хусейн<sup>2</sup>, Хассан Сади Ибрагим<sup>1</sup>,  
Глауберман М.А.<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Одесская государственная академия холода, 65082, г. Одесса, ул. Дворянская, 1/3,

<sup>2</sup>Ministry of Higher Education & Scientific Research – KRG

<sup>3</sup>ИНВЦ при ОНУ им И. Мечникова, 65082, г. Одесса, ул. Дворянская, 2.

## **Теплофизические основы многофункциональных солнечных систем. Часть I.**

*Разработаны теплофизические основы создания многофункциональных солнечных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха. Тепломассообменные аппараты осушительной и охладительной части схем основаны на пленочном поперечном взаимодействии потоков газа и жидкости и в них используются, для создания насадки, многоканальные многослойные структуры высокой плотности из полимерных материалов. Разработаны основные модификации плоских солнечных коллекторов для солнечной части систем*

**Введение.** Интерес к возможностям испарительных охладителей сред в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой [1-4]. Испарительные охладители могут использоваться как в автономном варианте, так и в комбинированных системах, например в составе солнечных осушительно-испарительных охладителей, где предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения [3, 6-8]. Разработаны основные схемные решения для осушительно-испарительных холодильных и кондиционирующих систем с непрямой регенерацией абсорбента. В рамках этой темы разработана современная тепломассообменная аппаратура для альтернативных систем (жидкостные солнечные коллекторы, абсорбер, десорбер, испарительные охладители) на основе полимерных многоканальных и многослойных структур. В основу разработок положены результаты многолетних исследований авторов в области разработки и создания компактной аппаратуры пленочного типа.

**I. Разработанные схемные решения для многофункциональных солнечных систем.** Универсальный характер разработанных решений позволяет использовать солнечные системы горячего водоснабжения и испарительные охладители сред в автономном виде, а также в виде осушительно-испарительных систем, в которых солнечная энергия обеспечивает процесс восстановления абсорбента и поддерживает непрерывность цикла.

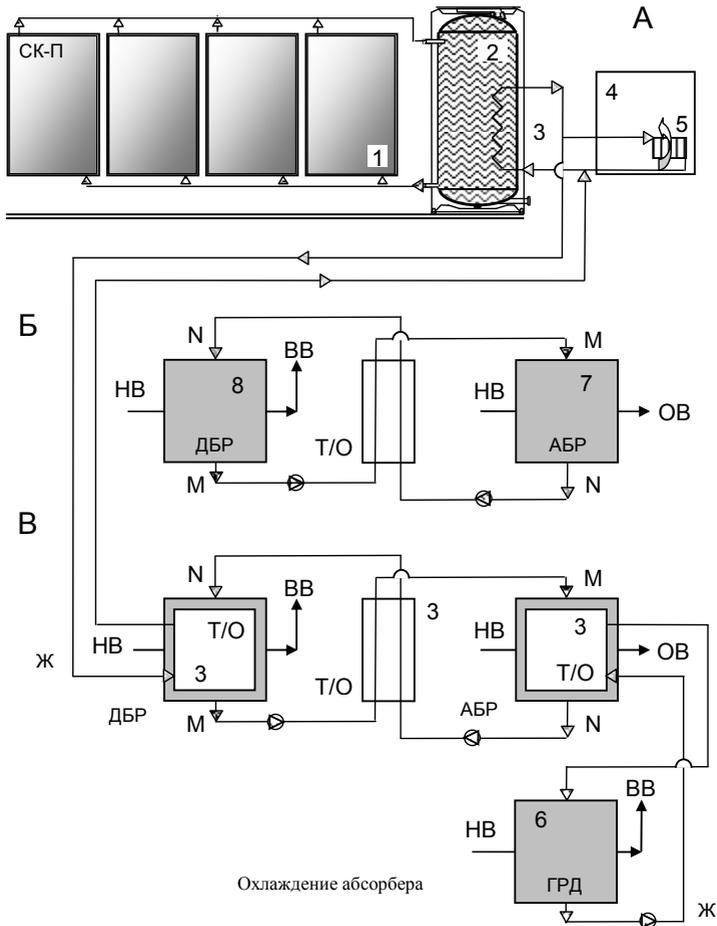
Требования к солнечным системам и параметрам комфортности в помещении. Выполненный аналитический обзор работ в области солнечных холодильных систем, позволил выделить, в качестве перспективного направления разработок, следующие принципы: солнечные абсорбционные системы с использованием жидких растворов абсорбентов, обеспечивающие простое решение для поддержания непрерывности цикла и минимизацию энергозатрат на организацию движения теплоносителей; широкое использование полимерных материалов в конструкции всех основных элементов осушительного и охладительного контуров систем, в солнечных коллекторах и тепломасообменных аппаратах. Анализ позволил выделить в качестве основного направления разработок солнечные абсорбционные системы с непрямой регенерацией абсорбента, позволяющие, применительно к солнечным системам кондиционирования воздуха (ССКВ) проводить термовлажностную обработку воздушного потока, поступающего в помещение, а применительно к солнечным холодильным системам (СХС) проводить охлаждение сред. Такие системы базируются на использовании испарительных охладителей воды в охладительном блоке, поступающей затем в водо-воздушные теплообменники.

Основными элементами ССКВ и СХС являются солнечные коллекторы, абсорберы-осушители воздуха АБР, десорберы-регенераторы ДБР и испарительные охладители воздуха и воды.

На рис. 1 и рис. 2 приведены основные варианты разработанных альтернативных систем (в приложении к задачам кондиционирования воздуха ССКВ и охлаждения СХС) на основе открытого абсорбционного цикла и солнечной регенерации абсорбента. Схемы включают два основных блока: блок предварительного осушения воздуха и блок испарительного охлаждения. В качестве основных элементов осушительный блок включает: абсорбер (1) (осушитель воздуха); солнечную систему регенерации абсорбента, состоящую из десорбера-регенератора (3), набора требуемого числа солнечных коллекторов СК/П (6) и бак-теплоаккумулятора (7); теплообменники (4) (внутренняя рекуперация тепла «слабого» холодного и «крепкого» горячего растворов абсорбента) и (4") (охлаждение крепкого раствора абсорбента перед его поступлением в абсорбер; в схеме охлаждения используется «технологическая» градирня). Тепло, необходимое для регенерации абсорбента обеспечивается солнечной системой (гелиосистемой), а охлаждение абсорбера – автономной вентиляторной градирней ГРН/т (градирня технологического назначения, (5). Охлаждение абсорбера, в котором, в процессе поглощения влаги из осушаемого воздуха, выделяется тепло, обеспечивает приближение к изотермичности процесса абсорбции и повышает эффективность всей схемы в целом [1 – 2]. В схеме охлаждения абсорбера может использоваться вынесенный теплообменник (4"), либо это может быть специальный водоохлаждаемый абсорбер, в котором теплообменник расположен непосредственно в объеме насадки.

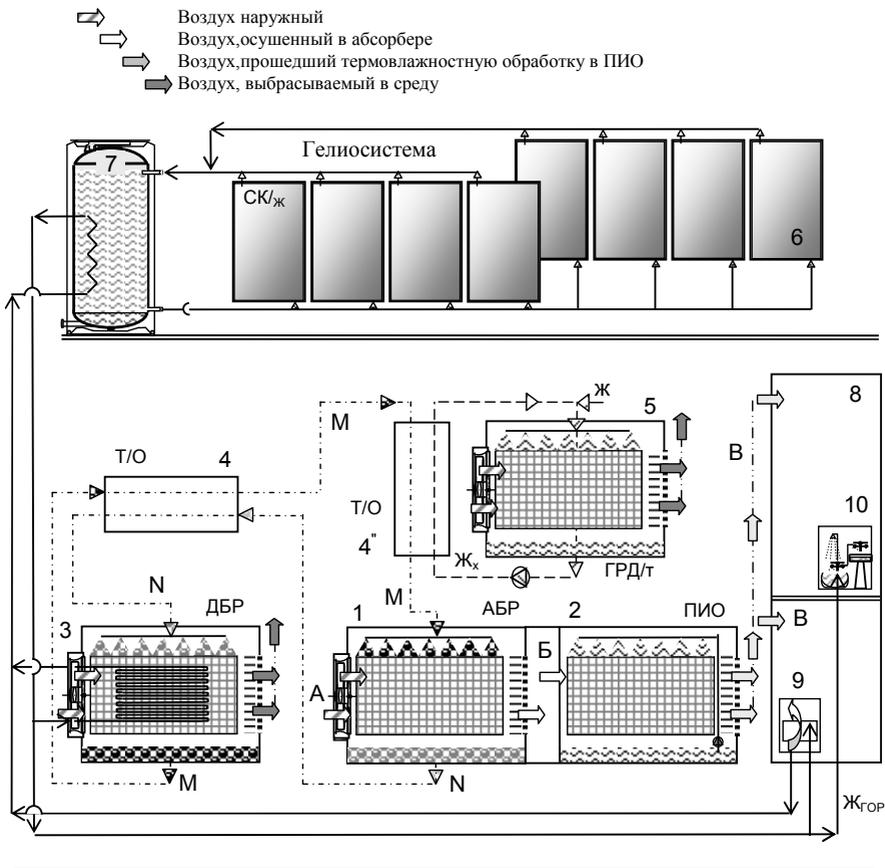
Охладительный блок ССКВ включает испарительный охладитель воды, – продуктовую градирню (5А). Воздух, осушенный в абсорбере (1) и имеющий низкую температуру точки росы, поступает в градирню ГРД, где обеспечивается глубокое охлаждение воды, которая может использоваться в вентилируемых

Солнечное теплоснабжение и обеспечение регенерации абсорбента (ССГВ)



**Рис. 1.** Элементная база альтернативных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха автономных объектов АСТХиКВ. Сушительная часть системы.

1 – солнечный коллектор СК; 2 – бак-теплоаккумулятор; 3 – теплообменник; 4 – помещение; 5 – водо-воздушный теплообменник; 6 – ГРД – градирня; 7 – абсорбер; 8 – десорбер. НВ – наружный воздух; ОВ – осушенный воздух; ВВ – выброс; М, N – крепкий и слабый растворы абсорбента. ж – вода.



**Рис. 2.** Принципиальная схема солнечной системы кондиционирования воздуха с использованием испарительного воздухоохладителя прямого типа ПИО в охлаждающем контуре.

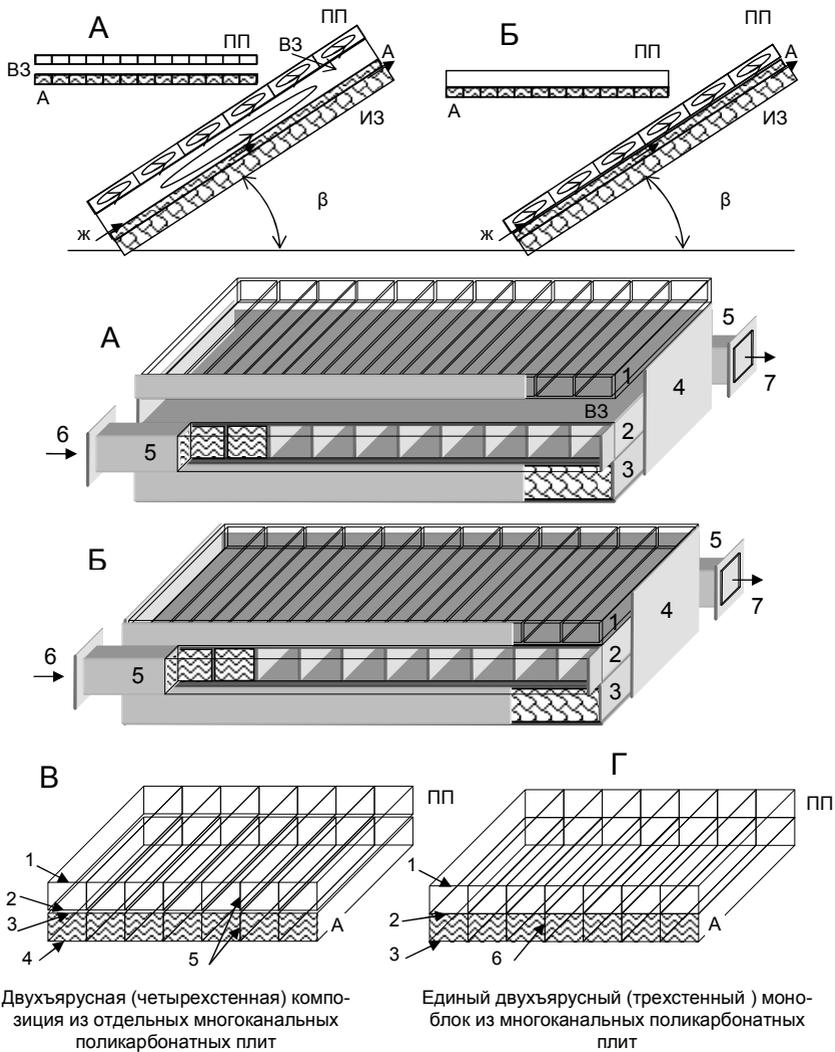
1 – абсорбер; 2 – испарительный охладитель; 3 – десорбер; 4, 4'' – теплообменники; 5 – радиатор; 6 – солнечный коллектор; 7 – бак-теплоаккумулятор; 8 – помещение; 9 – водо-воздушный теплообменник; 10 – санузел, А – наружный воздух; Б – осушенный в абсорбере воздух; В – воздушный поток после термовлажностной обработки в ИО; М, N – крепкий и слабый растворы абсорбента.

теплообменниках-охладителях (9), устанавливаемых непосредственно в кондиционируемых помещениях (8), либо холодильных камерах. Охладительный блок в этом случае может располагаться вне кондиционируемых помещений и здания. Одновременная подача в помещении воздушного потока, прошедшего термовлажностную обработку и холодной воды из ГРД сегодня самое распространенное решение применительно к системам СКВ.

Особый интерес представляют схемные решения альтернативных систем с использованием градирни ГРД в охлаждающем контуре [5]. Такие решения делают открытые системы охлаждения, к которым принадлежат испарительные охладители сред, безопасными с точки зрения загрязнения «продуктовой» воды, поступающей в теплообменники-охладители.

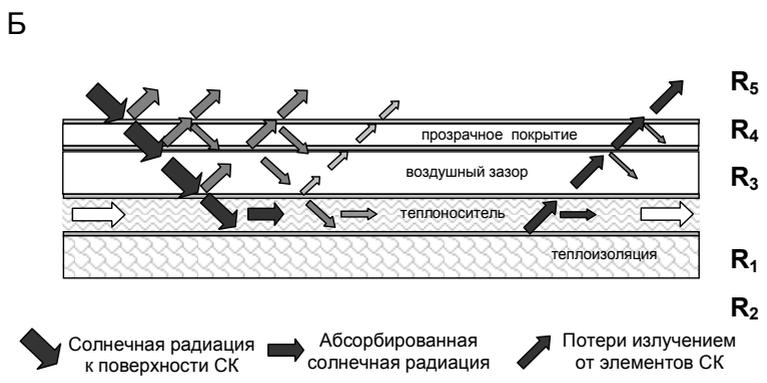
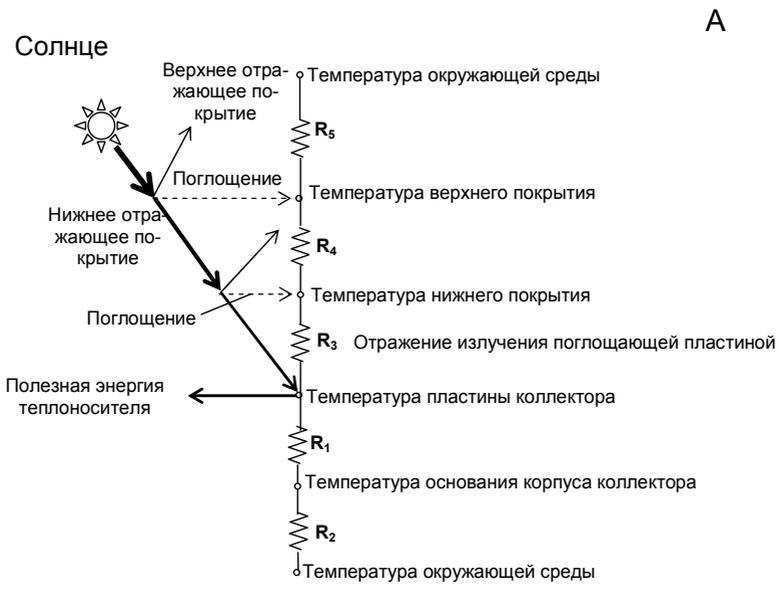
**II. Разработанные модификации полимерных солнечных коллекторов для альтернативных систем.** Ранее, в ОГАХ были выполнены исследования, посвященные созданию плоских солнечных коллекторов из полимерных материалов. Впервые были подтверждены высокие характеристики полимерных СК, сравнительно с традиционным типом СК с абсорбером, выполненным из цветных металлов в виде оребренного трубного регистра. Это позволяет устранить негативное влияние термического сопротивления в месте «сшивки» труб и ребер и значительно, при неизменных габаритах СК (при неизменной площади приема солнечной энергии), увеличить суммарную площадь каналов абсорбера. Были показаны и серьезные экологические преимущества перехода на полимерные материалы. В работе В. Костенюка [5] была показана целесообразность устранения воздушного зазора, без сколь либо существенного снижения эффективности полимерного СК. Это позволяет не только уменьшить высоту полимерного солнечного коллектора СК/П, но, главное, повысить жесткость и надежность структуры солнечного коллектора. При этом было показано, что такой эффект достижим только при переходе на двухъярусный моноблок в конструкции полимерного СК (рис. 3, позиция Г), что позволяет избежать дополнительного термического сопротивления и потери оптических свойств структуры СК в целом. На основании этого анализа, в качестве исходных принципиальных решений для совершенствования полимерного солнечного коллектора, было принято: модель СК/П без воздушного зазора между абсорбером и прозрачным покрытием (рис. 4, позиции Б и Г); использование прозрачного покрытия с шагом (расстоянием между вертикальными перегородками) не менее 25 мм.

Выполнено математическое моделирование СК из полимерных многоканальных плит, имеющих сотовую структуру, причем такие многоканальные плиты (рис. 4) используются в качестве теплоприемника (абсорбера), так и в качестве прозрачного покрытия (ПП). Такая плита может рассматриваться как обычное двойное прозрачное покрытие ПП с воздушным зазором между ними, а сам СК представляет собой коллектор с двойным прозрачным покрытием. Хорошо известно, что использование двойного ПП существенно снижает величину суммарного коэффициента потерь в СК [5], но обычно применяемое ПП в виде двойного остекления приводит к росту веса и габаритов СК. Использование же полимерной многоканальной плиты практически не изменяет эти пока-



**Рис. 3.** Разработанные типы плоских жидкостных солнечных коллекторов СК/П из полимерных материалов.

АБ – Варианты компоновки полимерных коллекторов, ВГ – Варианты компоновки абсорбера ( теплоприемников), А (2) – абсорбер (теплоприемник); ПП (1) – прозрачная изоляция; ИЗ (3) – теплоизоляция; ВЗ – воздушный зазор; 4 – корпус СК; 5 – гидравлические коллекторы СК; 6, 7 – теплоноситель.



*Рис. 4. Характерная тепловая цепь для полимерного солнечного коллектора СК-II с воздушным зазором между нижней пластиной прозрачного покрытия и верхней пластиной теплоприемника*

затели, играя в то же время роль «двойного остекления». В качестве абсорбера в полимерном СК используется такая же полимерная плита другого размера; внутренние ребра-перегородки абсорбера расположены перпендикулярно ребрам прозрачного покрытия, что определяется требованиями жесткости. Распределения температур каждого элемента СК, включая теплоноситель, определяли на основании уравнений теплового баланса. При выводе уравнений были сделаны следующие допущения: режим работы солнечного коллектора стационарный; градиентом температуры теплоносителя по периметру канала можно пренебречь; температура каждого покрытия (элемента СК/П) изменяется только по направлению движения теплоносителя и свойства материала полимерных панелей и теплоносителя не зависят от температуры; поглощение солнечной энергии покрытиями коллектора не влияет на тепловые потери коллектора в целом.

В рассматриваемой конструкции полимерного СК черновое покрытие нанесено на нижнюю сторону теплоприемника (абсорбера), поэтому над плитой абсорбера находится еще три полимерные плиты: 1 – прозрачная сторона (пластина) абсорбера, 2 и 3 – стенки прозрачного покрытия (ПП). В первом приближении, тепловой расчёт полимерного коллектора определяется следующей системой уравнений (рис.4):

$$\begin{cases} U_{30} \cdot (T_3 - T_0) = U_{23} \cdot (T_2 - T_3); \\ U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\ -\alpha_{1ж} \cdot (T_1 - T_{ж}) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\ -\alpha_{A1}^p \cdot (T_A - T_1) - \alpha_{A1}^k \cdot (T_A - T_{ж}) + J = -U_A^{нз} \cdot (T_0 - T_A); \\ c_{ж} \cdot \delta_A \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_{ж}^- (T_1 - T_{ж}) + \alpha_A^+ (T_A - T_{ж}); \\ \text{при } x = 0, T_{ж} = T_{ж}^0. \end{cases}$$

Решением этой системы является система

$$T_{ж}(x) = \frac{b_0 T_0 + I}{b_{ж}} \left( \exp\left(\frac{b_{ж}}{a_{ж}} x\right) - 1 \right) + T_{ж}^0,$$

$$\begin{cases} a_{ж} = \frac{c_{ж} \cdot \delta_A \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж}}{\alpha_{ж}^k}; \\ b_{ж} = \chi_{ж} K_A - 2K_A + \alpha_A^p \cdot \chi_{ж} + \alpha_{A1}^k; \\ b_0 = \chi_0 K_A + \alpha_{A1}^p \cdot \chi_0 + U_A^{нз}; \\ \chi_{ж} = \frac{K_{ж}}{K_{ж} + K_0}; \\ \chi_0 = \frac{K_0}{K_{ж} + K_0}; \\ K_{ж} = \alpha_{1ж} \cdot (U_{23} \cdot U_{30} + U_{12} \cdot U_{30} + U_{12} \cdot U_{30}); \\ K_0 = U_{12} \cdot U_{30} \cdot U_{23}; \\ K_A = \alpha_{A1}^p + \alpha_{A1}^k + U_A^{нз}; \end{cases}$$

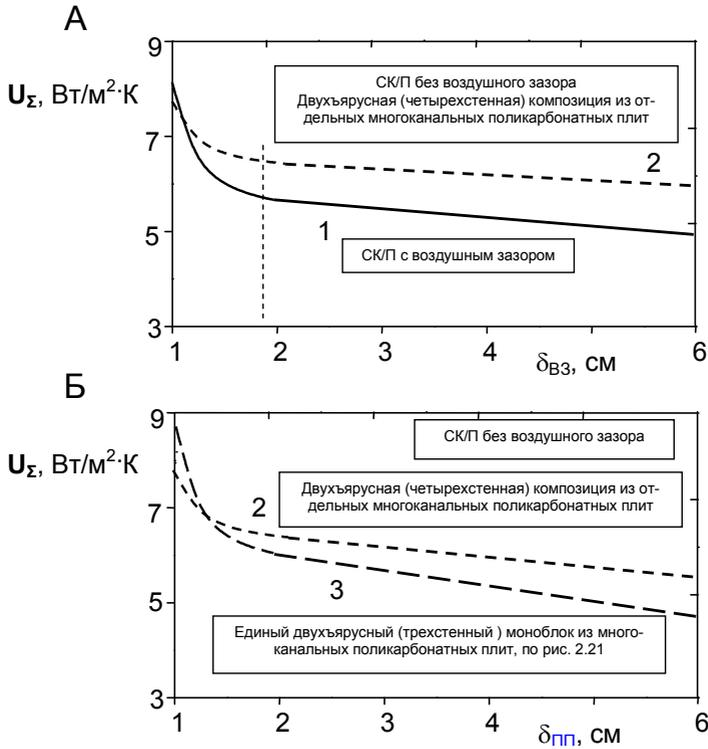
описывающая изменение температуры жидкости по длине канала полимерной плиты абсорбера.

Здесь  $U$  – величина коэффициента суммарных потерь тепла ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ ), на каждом рассматриваемом участке (элементе) СК;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$ );  $T$  – температура ( $^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{K}$ );  $J$  – суммарная интенсивность потоков прямой и рассеянной солнечной радиации ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость жидкостей;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );  $V_{\text{ж}}$  – расход жидкости;  $x$  – влагосодержание ( $\text{г}/\text{кг}$ ),  $\lambda_{\text{ж}}$  – коэффициент теплопроводности жидкости,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $d_{\text{э}}$  – эквивалентный диаметр канала абсорбера,  $\text{мм}$ ;  $\alpha_{\text{A1}}^{\text{P}}$ ,  $\alpha_{\text{A2}}^{\text{P}}$ ,  $\alpha_{\text{23}}^{\text{P}}$ ,  $\alpha_{\text{30}}^{\text{P}}$  – радиационная составляющая тепловых потерь с нижней поверхности абсорбера к верхней, в воздушном зазоре, с нижней поверхности прозрачного покрытия к верхней, с поверхности прозрачной изоляции (поликарбонатной плиты) в окружающую среду соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\alpha_{\text{A1}}^{\text{K}}$ ,  $\alpha_{\text{Aж}}^{\text{K}}$ ,  $\alpha_{\text{12}}^{\text{K}}$ ,  $\alpha_{\text{23}}^{\text{K}}$ ,  $\alpha_{\text{30}}^{\text{K}}$  – конвективная составляющие теплоотдачи от верхней и нижней поверхности абсорбера жидкости, тепловых потерь в воздушном зазоре, между нижней и верхней поверхностью прозрачного покрытия и с поверхности прозрачного покрытия,  $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;  $\delta_{\text{ВЗ}}$ ,  $\delta_{\text{ПИ}}$ ,  $\delta_{\text{А}}$  – толщины (высоты) воздушного зазора между теплоприемником и прозрачным покрытием, прозрачного покрытия из многоканальной плиты, жидкостного канала теплоприемника, соответственно,  $\text{мм}$ .

В дальнейшем, при разработке солнечных систем, основным принятым решением был СК/П на основе трехстенной моноблоковой композиции без воздушного зазора между абсорбером и прозрачным покрытием, что, наряду со снижением тепловых потерь, обеспечивает высокую прочность и надежность конструкции коллектора в целом.

### **Выводы:**

1. Разработаны солнечные многофункциональные системы, основанные на принципе предварительного осушения наружного воздуха и последующего испарительного охлаждения продуктовых сред (воды или воздуха);
2. Разработаны солнечные коллекторы с теплоприемником и прозрачным покрытием из полимерных материалов (с насадкой в виде единого двухъярусного (трехстенного) моноблока из многоканальных поликарбонатных плит.
3. Переход на моноблоковую полимерную композицию обеспечивает снижение уровня тепловых потерь до уровня потерь в СК/П с воздушным зазором; рост высоты верхнего яруса моноблока, выполняющего роль воздушного зазора в традиционной компоновке СК обеспечивает снижение уровня тепловых потерь (рис. 5);
4. Переход от четырехстенной к трехстенной моноблоковой композиции (рисунок 5, позиция Б) обеспечивает существенное снижение уровня тепловых потерь, благодаря снижению величины термического сопротивления на стыковке двух полимерных пластин.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента суммарных тепловых потерь  $U_{\Sigma}$ :

А – от ширины воздушного зазора  $\delta_{\text{вз}}$ ; (1 – SK/П с воздушным зазором; 2 – SK/П без воздушного зазора; двухъярусная (четырёхстенная) композиция из отдельных многоканальных поликарбонатных плит).

Б – от высоты прозрачного покрытия  $\delta_{\text{пп}}$ ; варианты SK/П без воздушного зазора.

### Литература:

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Глауберман М.А. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика) – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 374 с.
2. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. – Донецк.: Норд-Пресс, 2007. – 362 с.
3. Дорошенко А. Компактная теплообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). Докторская диссертация,

- Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. Одесса. – 1992. – Т. 1. – 350 с.; Т. 2. – 260 с.
4. Шервуд Т., Пизфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М. Химия, 1982. – 696 с.
  5. Костенюк В.В. Дорошенко А.В. Тепловые испытания полимерных солнечных коллекторов. // Холодильна техніка та технологія. – 2010. – №4. – С. 54-59.
  6. Дорошенко А.В., Франко Ю.А., Хасан Сади Ибрагим, Глауберман М.А. Процессы совместного тепломасообмена в испарительных охладителях прямого типа. // Холодильна техніка і технологія. – 2010. – №.1 (123). – С.46-54.
  7. Foster R.E., Dijkstra E. Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide. International Conference of Applications for Natural Refrigerants' 96, September 3-6, Aarhus, Denmark, IIF/IIR, 1996. – P. 101-109.
  8. John L., McNab, Paul McGregor Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger // 21<sup>h</sup> International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0646. – 2003.

**Doroshenko A.V., Jamal Kamal Husain, Hassan Sadi Ibrahim, Glauberman M.A.**

### **Thermophysical foundations of multi-function solar systems. Part I.**

#### SUMMARY

*The circuit decisions of multifunctional solar systems of heating, cooling and air conditioning are developed. Heat-mass-transfer devices are based on film interaction of flows of gas and liquid and in them are used for creation apparatus multichannel of structure of high density from polymeric materials. The basic updatings of flat solar collectors for a solar part of systems are developed.*

**Дорошенко О. В., Jamal Kamal Husain, Хасан Саді Ібрагим, Глауберман М.А.**

### **Теплофізичні основи багатофункціональних сонячних систем. Частина I.**

#### АНОТАЦІЯ

*Розроблені теплофізичні основи створення багатофункціональних сонячних систем тепло-хладоснабження і кондиціонування повітря. Тепломасообмінні апарати осушної і охолоджувальної частини схем засновані на плівковій поперечноточном взаємодії потоків газу і рідини і в них використовуються, для створення насадки, багатоканальні багатощарові структури високої щільності з полімерних матеріалів. Розроблені основні модифікації плоских сонячних колекторів для сонячної частини систем*