

РАЗДЕЛ 2

ЭНЕРГЕТИКА И ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ
ТЕХНОЛОГИИ

УДК 536.248.2:532.529.5

А.В. Дорошенко, В.И. Милованов, С.С. Силич

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082

РАЗРАБОТКА ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ СОЛНЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ДЛЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ

Разработаны принципиальные схемы многофункциональных солнечных систем осушения воздуха, теплоснабжения (горячего водоснабжения и отопления), хладоснабжения и кондиционирования воздуха на основе открытого абсорбционного цикла с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента. Разработаны основные принципиальные решения для нового поколения газо-жидкостных солнечных коллекторов. Выполнен анализ тепловых потерь в газо-жидкостных солнечных коллекторах

Ключевые слова: многофункциональные системы – солнечная энергия – солнечные коллекторы – регенерация абсорбента

The basic circuits of multifunctional solar systems of drainage of air, heating (hot water supply and heating), cooling and air conditioning are developed on the basis of open absorption of a cycle from a straight line by regeneration absorbent. The basic decisions for new generation of gas-liquid solar collectors are developed. The analysis of thermal losses is executed in gas-liquid solar collectors

Keywords: Multifunctional systems – solar energy – solar collectors – regeneration

I. ВВЕДЕНИЕ

Солнечные системы осушительно-испарительного типа на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла разрабатываются как с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента, так и с непрямой регенерацией [1-4]. Прямая регенерация абсорбента снижает температурный уровень регенерации до температур не превышающих 70⁰С [7], что обеспечивает возможность построения солнечных систем на основе плоских солнечных коллекторов-регенераторов и устраняет необходимость в десорбере традиционного типа и солнечной водонагревательной системе.

II. РАЗРАБОТКА СОЛНЕЧНЫХ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Плоский солнечный газо-жидкостной коллектор СК/г-ж является важнейшей частью системы регенерации (восстановления абсорбента) и, в отличие от всех известных типов СК, представляет собой теплообменник аппарат, в котором движение воздушного потока обеспечивается солнечным разогревом (разностью плотностей воздуха на входе и выходе из СК/г-ж). Он

включает (рисунок 1) теплоприемник (абсорбер, А), прозрачное покрытие (ПП) с воздушным зазором между ПП и теплоприемником (каналом, по которому движется воздушный поток), и теплоизоляцию дна (ИЗ). Прозрачное покрытие для снижения тепловых потерь может выполняться многослойным и включать замкнутые каналы.

Теплоприемник СК/г-ж представляет собой набор элементов U-образной формы (рисунок 1, позиция А), выполнен из алюминиевого листа с черновым покрытием поверхности и обеспечивает одновременный прогрев как самого воздушного потока, так и абсорбента, стекающего в виде тонкой пленки по «дну» теплоприемника под воздействием сил гравитации. Дно канала СК/г-ж выполнено из плоского, либо профилированного вдоль течения жидкостной пленки (позиция В), что позволяет увеличить смоченную поверхность и интенсифицирует процессы теплообмена при регенерации абсорбента. Нагрев воздушного потока обеспечивает его движение через воздушный канал СК/г-ж; нагрев абсорбента обеспечивает необходимые условия для реализации процесса десорбции (удаления водяных паров из раствора, диффузии паров в воздушный поток и выноса водяных паров в окру-

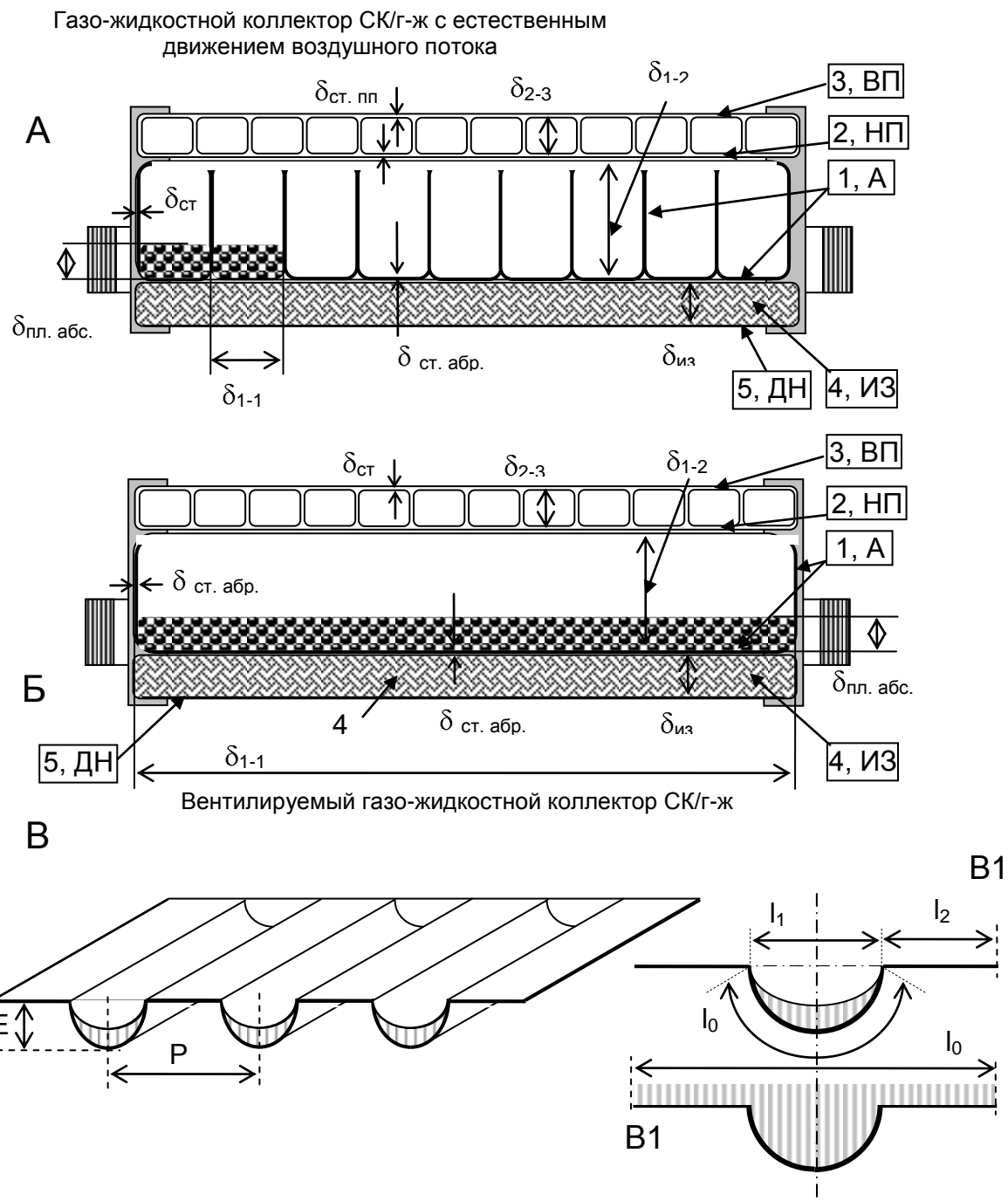


Рисунок 1 – К расчету тепловых потерь в газо-жидкостном солнечном коллекторе с гравитационным течением пленки абсорбента.

А – газо-жидкостной коллектор СК/г-ж с естественным движением воздушного потока;

Б – вентиляруемый газо-жидкостной коллектор СК/г-ж;

В – геометрия профилированного дна СК/г-ж и характер смоченных участков.

Обозначения: 1 (А) – теплоприемник (абсорбер); 2 – нижнее прозрачное покрытие (НП); 3 – верхнее прозрачное покрытие (ВП); 4 – теплоизоляция дна; E, P, δ , l – геометрические размеры основных элементов коллектора-регенератора

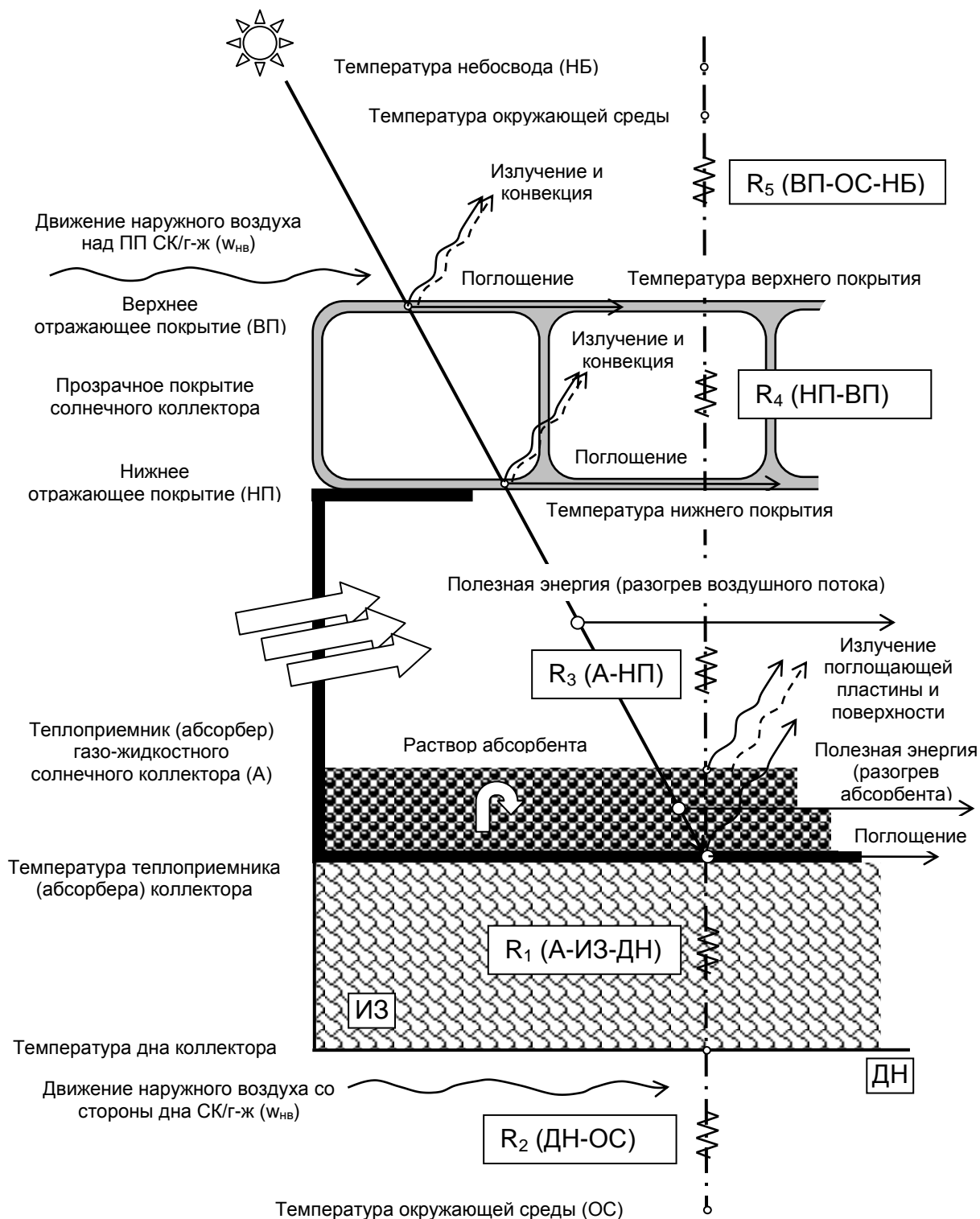


Рисунок 2 – К расчету тепловых потерь в газо-жидкостном солнечном коллекторе с гравитационным течением пленки абсорбента. Характерная тепловая цепь СК/г-ж

Обозначения: 1 (А) – теплоприемник (абсорбер); 2 – нижнее прозрачное покрытие (НП); 3 – верхнее прозрачное покрытие (ВП); 4 – теплоизоляция дна; ОС – окружающая среда; НБ – небосвод

-жающую среду). Ребра прозрачного покрытия ПП для повышения жесткости изделия расположены перпендикулярно ребрам-перегородкам теплоприемного канала. Разработаны варианты коллектора-регенератора СК/г-ж в обычном и вентилируемом вариантах (рисунок 1, позиции А и Б). Для организации движения воздуха используются малонапорные вентиляторы тангенциального типа. Солнечный коллектор-регенератор, как и обычный СК, ориентирован на юг, может устанавливаться вертикально, или под определенным углом наклона к горизонтальной поверхности для максимального приема солнечной энергии, с учетом характера системы: $\beta = \varphi$ для круглогодичных гелиосистем и $\beta = \varphi - 15^\circ$ для сезонных гелиосистем (период эксплуатации апрель – октябрь). Уточнение величины этого угла, необходимое для максимального улавливания падающей на поверхность СК/р солнечной энергии, приведено в работе [1].

III. ПРОЦЕССЫ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В СОЛНЕЧНОМ ГАЗОЖИДКОСТНОМ КОЛЛЕКТОРЕ-РЕГЕНЕРАТОРЕ

Распределение температур каждого элемента СК/г-ж, включая теплоносители, определяем на основании уравнений теплового баланса. При выводе уравнений, сделаны допущения: режим работы солнечного коллектора стационарный; градиентом температуры теплоносителей по периметру канала можно пренебречь; температура каждого элемента СК/г-ж изменяется только по направлению движения теплоносителя; свойства материалов коллектора и теплоносителей не зависят от температуры; поглощение солнечной

энергии покрытиями коллектора не влияет на потери коллектора в целом.

Коэффициенты теплоотдачи (их радиационные и конвективные составляющие) можно рассчитать по известным выражениям [1], тепловая цепь для СК/г-ж приведена на рисунке 2. Для наружной поверхности коллектора со стороны солнца (*покрытие ВП – ОС*, здесь индексы: НБ – для небосвода; ОС – для окружающей среды, ВП – для верхнего прозрачного покрытия), можно использовать зависимости:

$$\begin{aligned} q_{\text{ВП-ОС}} &= (\alpha_{\text{ВП-ОС}}^k + \alpha_{\text{ВП-ОС}}^p) F_{\text{СК/р}} (T_{\text{ВП}} - T_{\text{ОС}}) = \\ &= (T_{\text{ВП}} - T_{\text{ОС}}) / R_5 \\ \alpha_{\text{ВП-ОС}}^k &= (5,7 + w_{\text{возд}}) \\ \alpha_{\text{ВП-ОС}}^p &= \varepsilon_{\text{п}} \sigma (T_{\text{ВП}} + T_{\text{ОС}}) (T_{\text{ВП}}^2 + T_{\text{ОС}}^2) [(T_{\text{ВП}} - T_{\text{НБ}}) / \\ & (T_{\text{ВП}} - T_{\text{НБ}})] \end{aligned} \quad (1)$$

где: α^k и α^p – конвективная и радиационная составляющие коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·К); w – скорость ветра над ВП коллектора, м/с; $\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м⁴·град²); R_5 – термическое сопротивление на рассматриваемом участке 3 – ОС.

Для всех внутренних полостей коллектора: – *покрытие НП – ВП*, воздушный зазор в многоканальной полимерной плите ПП, здесь индексы: ВП – для верхнего прозрачного покрытия; НП – для нижнего прозрачного покрытия); – *покрытие А – НП*, здесь индексы: НП – для нижнего прозрачного покрытия; А – для поверхности абсорбера), можно использовать зависимости:

$$\begin{aligned} q_{\text{НП-ВП}} &= (\alpha_{\text{НП-ВП}}^k + \alpha_{\text{НП-ВП}}^p) F_{\text{СК}} (T_{\text{НП}} - T_{\text{ВП}}) = (T_{\text{НП}} - T_{\text{ВП}}) / R_4 \\ \alpha_{\text{НП-ВП}}^k &= [1 - 0,0018 (T_{\text{НП}}/2 + T_{\text{ВП}}/2)] \times [1 - (\beta - 45 (0,00259 - 0,00144\varepsilon_{\text{ВП}}))] \times \\ & \times 1,14 (T_{\text{НП}} - T_{\text{ВП}})^{0,31} / \delta_{\text{НП-ВП}}^{0,07} \\ & (T_{\text{НП}}^2 + T_{\text{ВП}}^2) \\ \alpha_{\text{НП-ВП}}^p &= \sigma (T_{\text{НП}} + T_{\text{ВП}}) \frac{1}{(1/\varepsilon_{\text{НП}} + 1/\varepsilon_{\text{ВП}})} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} q_{\text{А-НП}} &= (\alpha_{\text{А-НП}}^k + \alpha_{\text{А-НП}}^p) F_{\text{СК}} (T_{\text{А}} - T_{\text{НП}}) = (T_{\text{А}} - T_{\text{НП}}) / R_3 \\ \alpha_{\text{А-НП}}^k &= [1 - 0,0018 (T_{\text{А}}/2 + T_{\text{НП}}/2)] \times [1 - (\beta - 45 (0,00259 - 0,00144\varepsilon_{\text{НП}}))] \times \\ & \times 1,14 (T_{\text{А}} - T_{\text{НП}})^{0,31} / \delta_{\text{А-НП}}^{0,07} \\ \alpha_{\text{А-НП}}^k &= (5,7 + w_{\text{возд}}) \quad (\text{в зависимости от величины } w_{\text{возд}}) \\ & (T_{\text{А}}^2 + T_{\text{НП}}^2) \\ \alpha_{\text{А-НП}}^p &= \sigma (T_{\text{А}} + T_{\text{НП}}) \frac{1}{(1/\varepsilon_{\text{А}} + 1/\varepsilon_{\text{НП}})} \end{aligned} \quad (3)$$

где: β – угол наклона СК/г-ж к горизонту, град; $\delta_{\text{анп}}$ – расстояние между соответствующими поверхностями, мм.

В зависимости от типа СК/г-ж, с «Естественной» тягой, обеспечиваемой солнечным прогревом воздуха или с вентилятором, расположенным на подаче воздуха в коллектор, в системе уравнений (3) следует использовать одно

из двух приведенных уравнений для расчета величины $\alpha_{\text{А-НП}}^k$. Для теплоизоляции (*А – ИЗ*) термическое сопротивление R_1 определяется теплопроводностью выбранного материала теплоизоляции. Для наружной поверхности коллектора со стороны дна (*ИЗ – ОС*) можно использовать формулы:

$$\begin{aligned}
 q_{\text{из-ос}} &= (\alpha_{\text{из-ос}}^k + \alpha_{\text{из-ос}}^p) F_{\text{ск/р}} (T_{\text{из}} - T_{\text{ос}}) = (T_{\text{из}} - T_{\text{ос}})/R_2 \\
 \alpha_{\text{вп-ос}}^k &= (5,7 + w_{\text{возд}}) \\
 \alpha_{\text{из-ос}}^p &= \varepsilon_{\text{п}} \sigma (T_{\text{из}} + T_{\text{ос}}) (T_{\text{из}}^2 + T_{\text{ос}}^2) [(T_{\text{из}} - T_{\text{ос}})/(T_{\text{из}} - T_{\text{нб}})]
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

В формулах 1-4 використовуватися наступні позначення:

$\alpha_{\text{а-ж}}^k$, $\alpha_{\text{а-нп}}^k$, $\alpha_{\text{нп-вп}}^k$, $\alpha_{\text{вп-ос}}^k$, $\alpha_{\text{из-ос}}^k$ – конвективні складові теплоотдачі від бокових і нижньої поверхні пластини теплоприемника (абсорбера) к рідині (теплоносітелю, в даному випадку к розчину абсорбента); теплових втрат від бокових поверхностей пластини теплоприемника (абсорбера) і поверхні рідині в повітряній частині робочого каналу СК/г-ж (А – НП); теплових втрат між нижньої і верхньої поверхнею прозорого покриття (НП – ВП); теплових втрат з поверхні прозорого покриття в оточуюче середовище (ВП – ОС); теплових втрат від «дно» теплоізоляції в оточуюче середовище (ІЗ – ОС) Вт/(м²·К).

$\alpha_{\text{а-нп}}^p$, $\alpha_{\text{нп-вп}}^p$, $\alpha_{\text{вп-ос}}^p$, $\alpha_{\text{из-ос}}^p$ – радіаційні складові теплових втрат від бокових поверхностей пластини теплоприемника (абсорбера) і поверхні рідині в робочому каналі СК/Р (А – НП); теплових втрат між нижньої і верхньої поверхнею прозорого покриття (НП – ВП); теплових втрат з поверхні прозорого покриття в оточуюче середовище (ВП – ОС); теплових втрат від «дно» теплоізоляції в оточуюче середовище (ІЗ – ОС) Вт/(м²·К).

Термічні опору основних елементів СК/г-ж визначають коефіцієнт втрат за формулою $U_i = 1/R_i$, де U_i – коефіцієнт втрат на кожному ділянці СК, Вт/(м²·град); R_i – термічне опору на кожному ділянці СК, (м²·К)/Вт. Величина сумарного коефіцієнта втрат для СК/г-ж визначається формулою:

$$U_{\Sigma} = 1/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5) \tag{5}$$

Основне значення, при правильному виборі типу і розрахунку товщини теплоізоляції, мають термічні опору на ділянках R_3 , R_4 , і R_5 , визначають теплові втрати колектора-регенератора.

На рисунку 3 наведено результати розрахунків теплової ефективності (коефіцієнта теплових втрат) для розробленого СК/г-ж в варіанті з природною тягою (А) і вентиляруемом варіанті (Б), для параметрів: $t_0 = 20^\circ\text{C}$; $t_1 = 50^\circ\text{C}$; $\beta = 30^\circ$; $\delta_{1,2} = 100\text{-}150\text{мм}$ (висота робочого каналу), $\delta_{1,1} = 1000\text{мм}$ (ширина робочого каналу, вентиляруемый варіант СК/г-ж); $\delta_{\text{из}} = 30\text{мм}$; $\lambda_{\text{из}} = 0,04$ Вт/(м²·К); $\delta_{2,3} = 10$ і 15мм ; $\delta_{2,2} = 10$ і 25мм (розміри ячеї прозорого покриття СК, ПП); $w_{\Gamma} = 0$. Основний інтерес представляють геометричні параметри робочого каналу СК/г-ж (в варіанті з природною

тягою). Из полученных результатов следует, что рост ширины канала $\delta_{1,1}$ приводит к возрастанию величины суммарных тепловых потерь U_{Σ} . Рабочий канал теплоприемника (абсорбера) невентилируемого СК/г-ж выполнен из U-образных элементов на основе алюминиевого листа с размерами $\delta_{1,2}/\delta_{1,1} = 2,0$, при $\delta_{1,2} = 100 - 150\text{мм}$ (оптимальные размеры канала), имеет черновое покрытие внутренней полости и профилирование «дна», по которому гравитационно стекает пленка раствора абсорбента. Для вентиляруемого варианта СК/г-ж уровень суммарных тепловых потерь возрастает, сравнительно с вариантом с естественной тягой, что обусловлено ростом конвективных потерь.

Существенную роль играет характер распределения жидкости по поверхности теплоприемника. Вариант полностью покрытой пленкой поверхности теплоприемника соответствует меньшему значению суммарных тепловых потерь, что связано со снижением как конвективных, так и радиационных составляющих тепловых потерь от поверхности жидкой пленки, сравнительно с этими же потерями от металлической (неоросенной) поверхности теплоприемника. Рабочий канал теплоприемника (абсорбера) вентиляруемого СК/г-ж выполнен из единого U-образного элемента на основе алюминиевого листа с размерами $\delta_{1,2} = 100\text{-}150\text{мм}$, при $\delta_{1,1} = 1000\text{мм}$, имеет черновое покрытие внутренней полости и профилирование «дна», по которому гравитационно стекает пленка раствора абсорбента;

Влияние параметров прозорого покриття СК/г-ж представлено на рисунку 3Г. При увеличении $\delta_{2,3}$ от 10 до 15 мм, величина U_{Σ} уменьшается в среднем от 7 до 5 Вт/м²·К, и с дальнейшим ростом воздушного зазора $\delta_{2,3}$ практически остается постоянной. Влияние ширины канала $\delta_{2,2}$ сказывается преимущественно на ухудшении оптических свойств прозорого покриття, выполненного из многоканальной полимерной плиты, поскольку число вертикальных прозорок перегородок в составе ПП при этом растет. Величины $\delta_{2,3} = 15$ мм и $\delta_{2,2} = 25$ мм (высота и ширина ячеї ПП) можно считать оптимальными для формирования прозорого покриття СК/г-ж. С увеличением толщины теплоізоляції $\delta_{\text{из}}$ коефіцієнт теплових втрат монотонно зменшується. По всій видимості, використовувати СК/г-ж з товщиною теплоізоляції $\delta_{\text{из}} > 40$ мм нецелесообразно, т. к. при этом U_{Σ} зменшується незначительно, а матеріальні затрати і габарити колектора суттєво зростають.

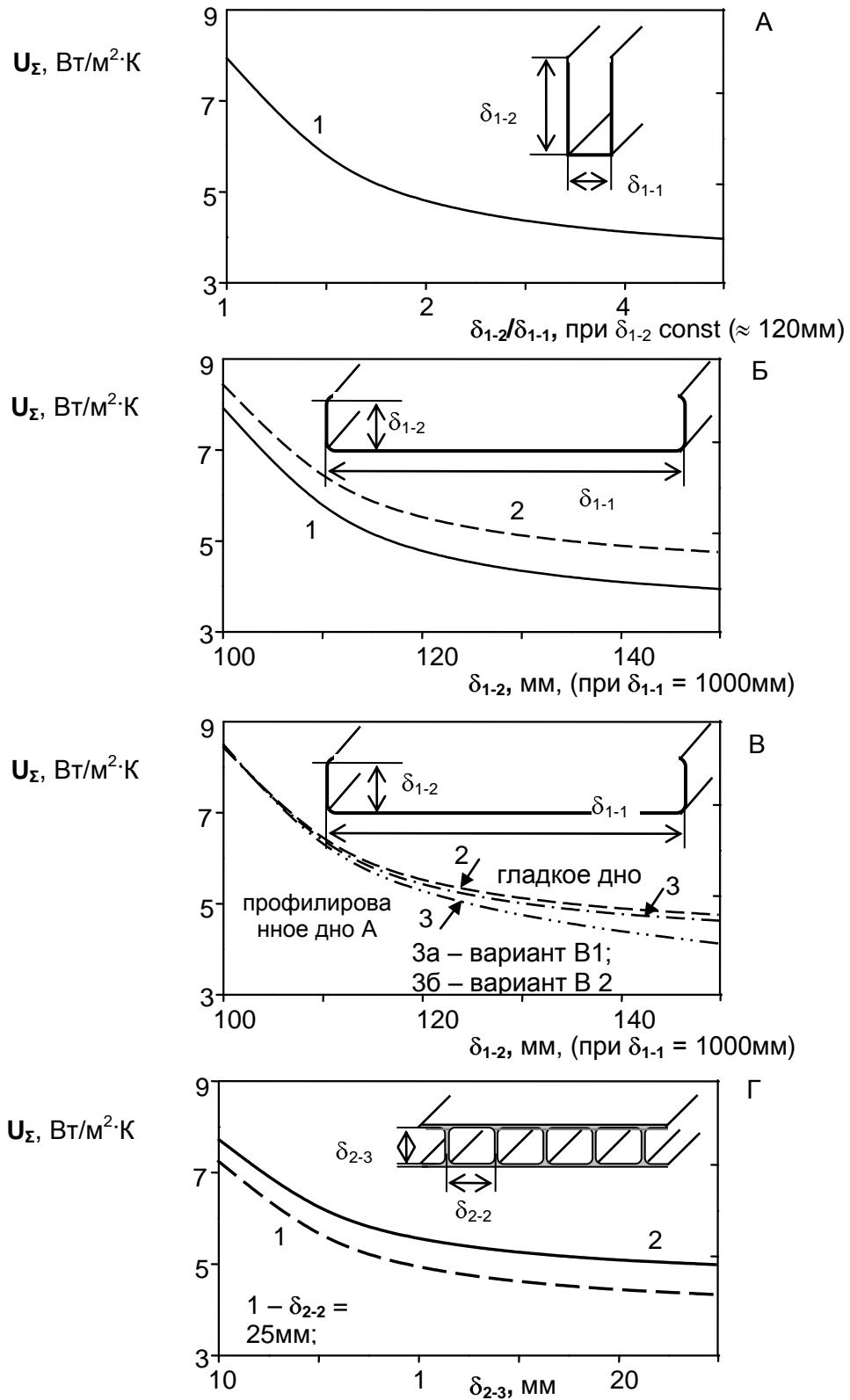


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента суммарных тепловых потерь U_{Σ} . А, Б – от геометрических размеров теплоприемника (абсорбера) с естественной тягой (линия 1) и в вентилируемом варианте (линия 2) СК/г-ж, соответственно (гладкое дно теплоприемника); В – от характера дна коллектора: линия 2 – гладкое дно; линия 3 – профилированное дно (вентилируемые варианты СК/г-ж); Г – от высоты прозрачного покрытия

Серьезный практический интерес представляет оценка влияния скорости ветра над поверхностью ПП СК (в известной мере и под дном СК, но здесь влияние погашается наличием правильно рассчитанной теплоизоляции) на коэффициент тепловых потерь, а, следовательно, и на к.п.д. СК. При изменении w_{Γ} от 0 до 5 м/с, величина U_{Σ} увеличивается наиболее существенно (на 20-30%). Из этого следует, что вопреки существующим рекомендациям, скорость ветра необходимо учитывать при расчетах СК и солнечных систем в целом. Важным, конечно, является влияние направления движения ветра в месте установки солнечной системы, а также и угол обтекания поверхности СК. Следует также учитывать, что скорость движения наружного воздуха накладывает отпечаток и на характер работы вентилятора тангенциального типа, достаточно чувствительного к такому воздействию.

ВЫВОДЫ

1. Солнечная система с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента позволяет снизить энергозатраты, поскольку традиционный десорбер и солнечная система нагрева теплоносителя здесь заменяется солнечным регенератором абсорбента, что обеспечивает автономность системы и позволяет создать солнечную многофункциональную систему жизнеобеспечения;

2. Разработаны солнечные коллекторы-регенераторы СК/г-ж для солнечных холодильных систем СХС и ССКВ, обеспечивающие восстановление концентрации абсорбента и поддержание непрерывности цикла только на основе солнечной энергии, обеспечивающей как необходимый подвод тепла, так и движение воздушного потока над поверхностью абсорбента,

стекающего в виде жидкостной пленки по внутренней поверхности теплоприемника газожидкостного коллектора СК/г-ж

ЛИТЕРАТУРА

1. А.Н. Горин, А.В. Дорошенко. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика), – Донецк: Норд-Пресс, 2008. 374 с.
2. Alexander V. Doroshenko. Leonid P. Kholpanov, Yury P. Kvurt. Alternative Refrigerating, Heat-Pumping and Air-Conditioning Systems on the Basis of the Open Absorption Cycle and Solar Energy. USA. Nova Science Publishers, Inc., 2009. – 210 p.
3. Doroshenko A., Boris Blyukher, Solar Power Engineering (Theory, Development, Practice), Handbook of Research on Solar Energy Systems and Technologies IGI Global, USA. 2012., 445 p.
4. Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Филин С.О., Богуслав Закшевский, Evaporative Coolers in Alternative Energetics / Испарительные охладители в альтернативной энергетике, Западно-поморский технологический университет, Щецин, Польша, 2012, 439 с.
5. Kvurt Y., Holpanov L., Doroshenko A., Kirillov V., Kontsov M. Solar systems of cooling and air conditioning, Mathematical modeling of resource-saving and ecologically safe technologies, Collection of scientific clauses MSU-RUAS, Moscow, 2000.- P. 26-49.
6. А.В. Дорошенко, М.А. Глауберман, Э.Т. Роговская. Солнечные плоские коллекторы из полимерных материалов // Физика аэродисперсных систем. – Одесса: ОНУ им. Мечникова, 2007.
7. Дорошенко А.В., Франко Ю.А., Джамаль Камаль Хусейн, Солнечные абсорбционные холодильные системы с газожидкостными коллекторами-регенераторами. Холодильная техника и технология. 2009. №1 (117), стр. 29-47.

Получена в редакции 18.01.2013, принята к печати 21.01.2013

