

Приборы и оборудование

УДК 532.5

Расчет параметров антиконвективной структуры солнечного коллектора

Луданов К.И.

Институт проблем материаловедения НАН Украины, Киев

Исследован теплообмен в плоских воздушных прослойках. Разработан метод расчета «щелевой» антиконвективной структуры солнечного коллектора. Получено аналитическое выражение критического шага «щелевой» антиконвективной структуры в зависимости от ширины ее полос, отношения абсолютных температур поверхности абсорбера и стекла, а также от угла наклона солнечного коллектора.

Ключевые слова: солнечный коллектор, коэффициент теплопотерь, антиконвективная структура, термическая проводимость.

Досліджено теплообмін у плоских повітряних прошарках. Розроблено метод розрахунку «щілинної» антиконвективної структури сонячного колектора. Отримано аналітичний вираз критичного кроку «щілинної» антиконвективної структури у залежності від ширини її полос, відношення абсолютних температур поверхонь абсорбера та скла, а також від кута нахилу сонячного колектора.

Ключові слова: сонячний колектор, коефіцієнт тепловтрат, антиконвективна структура, термічна провідність.

Солнечный коллектор (СК) представляет собой специальный теплообменник, в котором солнечное излучение, проходящее через его остекление, на поверхности абсорбера преобразуется в низкопотенциальное тепло, которое затем отводится от абсорбера СК нагреваемой водой. Абсорбер СК с тыльной стороны оснащен слоем теплоизоляции, его периметр также теплоизолирован. Лишь с лицевой стороны СК абсорбер почти не имеет теплоизоляции и представляет собой открытую систему. Это приводит к существенным теплопотерям от абсорбера в окружающую среду через стекло СК (то есть «прозрачную изоляцию»), которые в основном и определяют величину коэффициента теплопотерь СК.

Тепловой поток от абсорбера к стеклу включает две составляющие: радиационную, которую можно значительно уменьшить, нанося на абсорбер селективное покрытие; конвектив-

ную, которую можно вообще исключить, предельно откакумировав пространство между абсорбером и стеклом. Однако создать абсолютно герметичный корпус СК для обеспечения в нем высокого вакуума за счет однократного вакуумирования в процессе производства очень сложно и дорого. Поэтому такая технология почти не используется. Часто вместо этого для снижения теплопотерь в СК добавляют второе стекло. Но это вдвое снижает пропускную способность прозрачной изоляции СК (и соответственно его эксергетическую эффективность), а также существенно увеличивает массу, которая ограничена ГОСТом. Поэтому обычно рекомендуется просто увеличить толщину воздушной прослойки до 50–60 мм. Альтернативный путь в этом случае — установка в пространство между стеклом и абсорбером СК антиконвективной структуры (АКС), которая блокирует процесс

конвекции, резко снижая эту составляющую теплопотерь, поскольку неподвижный воздух — очень хороший теплоизолятор.

Оптимизация толщины воздушной прослойки в СК. Большинство выпускаемых в настоящее время в мире СК не оборудовано антиконвективной структурой [1]. По оценкам зарубежных специалистов [2], использование антиконвективных структур в СК неэффективно. Поэтому традиционно считается, что достаточное термическое сопротивление создает сама воздушная прослойка, толщина которой за рубежом принимается около дюйма (~ 25 мм), в бывшем СССР чуть больше (в СК1 Братского завода отопительного оборудования (БЗОО) — 30 мм). Работа [3] по оптимизации толщины воздушной прослойки СК подтвердила этот результат. Так, оптимальная толщина прослойки, установленная в результате численного моделирования, почти совпала с принятой для СК1 — 29 мм. Для СК с селективным покрытием абсорбера оптимальная величина зазора составляет 45–55 мм. Если при этом используется еще и улучшенная теплоизоляция с тыльной стороны СК, то оптимальная величина зазора достигает 50–60 мм, то есть почти половину всей толщины солнечного коллектора [3].

Антиконвективные структуры в воздушной прослойке СК. АКС СК была впервые предложена Вейнбергом [4] и испытана в СК, установленных на острове Чекелен, в 1930-е гг. Эта АКС представляла собой ячеистую конструкцию с треугольными ячейками из полос плотной бумаги с гладкой лощеной поверхностью. Она блокировала конвекцию в воздушной прослойке между стеклом и абсорбером и снижала таким образом теплопотери от СК.

В Научно-исследовательском институте сантехники (НИИСТ) (Киев) в 1980-е гг. по договору с БЗОО была разработана АКС с кубическими ячейками, образованными двумя рядами взаимно перпендикулярных полос из прозрачного пластика. Толщина воздушной прослойки между стеклом и абсорбером была 30 мм. Результаты испытаний СК БЗОО с такой АКС на имитаторе солнечного излучения показали, что установка АКС более эффективна, чем селективное покрытие поверхности абсорбера, и дает минимальное снижение оптической характеристики СК, тогда как селективное покрытие сильно ухудшает оптическую характеристику. Однако замкнутые ячейки АКС, хорошо выполняющие блокирование конвекции воздуха, резко ухудшают оптическую характеристику при углах падения, отличных от нуля, то есть до и после полудня [5].

В мире разработаны новые конструкции АКС так называемого щелевого типа, полосы

которой из прозрачной полимерной пленки установлены с определенным шагом между стеклом и абсорбером. Однако полимерные пленки имеют низкую температурную стойкость, и при аварийном повышении температуры абсорбера до так называемой равновесной температуры при прекращении циркуляции теплоносителя полимерная пленка деградирует и сильно деформируется.

Автором было запатентовано новое техническое решение для АКС [6], все элементы которой являются частями единой полосы из металлической фольги, натянутой в виде змейки на два ряда направляющих роликов, установленных рядами у восточной и западной сторон абсорбера СК. В этом случае плоскости всех полос хорошо отражающей и термостойкой фольги совпадают с плоскостью эклиптики (плоскостью видимого движения Солнца по небосводу в течение дня). Такие элементы АКС почти не создают тени на поверхности абсорбера, то есть не ухудшают оптическую характеристику СК. АКС из тонкой фольги практически не передает тепло за счет собственной теплопроводности, а ее положение даже при наличии температурного расширения фиксируется только одним упругим элементом (пружиной). Новая АКС, легкая и дешевая, может иметь коммерческую перспективу и устанавливаться в современных СК. Здесь имеет место лишь одна проблема — отсутствует метод расчета параметров такой АКС, то есть нет возможности рассчитать критический шаг элементов АКС в зависимости от ширины полосы, температур поверхности абсорбера и стекла, а также угла наклона СК к горизонту.

Конвективная устойчивость воздуха в полостях с градиентом температуры. В плоском горизонтальном слое воздуха между двумя твердыми поверхностями при условии, что нижняя поверхность нагрета сильнее, возникает тепловой поток снизу вверх посредством теплопереноса через воздух. Сначала он осуществляется только за счет теплопроводности воздуха (при этом $Nu \cong \alpha h/\lambda = 1$). Начиная с некоторого критического значения перепада температур, характеризующегося $Ra = Ra_{кр} = 1708$ [7], стратификация разрушается и возникает ламинарный режим свободной конвекции в виде упорядоченной ячеистой структуры, или так называемых ячеек Бенара. За счет конвективного движения воздуха интенсивность теплопередачи через плоскую воздушную прослойку резко увеличивается [8] в соответствии с зависимостью $Nu = 1 + 1,446(1 - Ra_{кр}/Ra)$. Затем при $Ra \approx 3 Ra_{кр}$ ($Nu \approx 2$) начинается режим неупорядоченной ламинарной конвекции с более высокой интенсивностью теплопередачи:

$Nu \cong 1 + 0,126 (Ra - Ra_{кр})^{0,25}$ [8], который продолжается вплоть до $Ra \approx 10 Ra_{кр}$. При $Ra > 10 Ra_{кр}$ режим теплопередачи в воздушной прослойке становится турбулентным и автомодельным по отношению к ее характерному размеру h в соответствии с теоретически установленной формулой $Nu = 0,13 Ra^{1/3}$, ведь $Nu \sim h$, а $Ra \sim h^3$. Экспериментальные результаты по теплопередаче в горизонтальных прослойках обобщаются иной зависимостью: $Nu \cong 0,109 Ra^{0,313}$ [9].

Критические значения критерия Релея для наклонной воздушной прослойки (до $\theta \leq 80^\circ$) увеличиваются с ростом угла θ ее наклона к горизонту в соответствии с формулой $Ra_{кр} = 1708 / \cos \theta$ [9].

Если в плоском горизонтальном слое воздуха установлена АКС типа «решетка», образующая прямоугольные ячейки, величина критического числа Релея $Ra_{кр} = 1708 [1 + 3,083 (h/\omega)^{1,63}]$ [9] значительно увеличивается и достигает значения для кубической полости $Ra_{кр} \cong 6974$.

Если в пространстве между стеклом и поверхностью абсорбера установлена АКС щелевого типа, воздушная прослойка делится на ряд щелевых каналов между соседними полосами фольги, которые своим присутствием заметно затрудняют возникновение конвекции, резко увеличивая значение $Ra_{кр}$. Например, теоретическое значение $Ra_{кр}$ для канала квадратного сечения равно 5099, причем интенсивность теплопередачи при возникновении конвекции растет сильнее, чем для плоского слоя: $Nu = 1 + 0,0179 (Ra - Ra_{кр})^{0,5}$ [7], увеличиваясь с ростом Ra в области ламинарного режима почти в 3 раза.

Для узких каналов АКС щелевого типа известны выражения критического числа Релея в виде [9]: $Ra_{кр} = 1708 [1 + 3 (h/\omega)^2]^{0,25}$ при низкотеплопроводных границах (где h — ширина полосы АКС, равная расстоянию между стеклом и поверхностью абсорбера; ω — расстояние между соседними полосами, то есть шаг АКС). Для высокотеплопроводных границ выражение для $Ra_{кр}$ иное: $Ra_{кр} = 1708 [1 + 22 (h/\omega)^2]^{0,167}$ (*).

Постановка задачи

Анализ опубликованных работ по данной проблеме показал, что в литературе имеют место различные и даже противоположные точки зрения на термическое сопротивление воздушной прослойки между абсорбером и стеклом в СК. Самое простое решение — повышать его за счет увеличения толщины зазора [2] — нецелесообразно, поскольку при толщине зазора 50–60 мм резко возрастают потери на затенение поверхности абсорбера стенками корпуса. Кроме того, оптимизация зазора [3] на основе формулы $Nu = 0,18 Ra^{0,25}$, которая получена, во-первых, при обобщении экспериментальных данных для замк-

нутых воздушных полостей различной формы, а во-вторых, она получена при условии $Ra \gg Ra_{кр}$.

Относительно устройств подавления конвекции в воздушном зазоре СК: разработаны новые технические решения АКС для современных СК, и детально исследованы физические механизмы возникновения и развития свободной конвекции в их ячейках. Проблема состоит в том, что для каждой конструкции АКС необходимо использовать индивидуальные зависимости для $Ra_{кр}$, например, в случае использования АКС щелевого типа необходимо определить, какие размеры ширины полосы и шага элементов АКС являются оптимальными для СК и при каких температурах воздуха в пространстве между стеклом и абсорбером. Решение этой задачи позволит оценить перспективность использования АКС и выбирать оптимальные размеры элементов антиконвективных структур в заданных условиях режимов работы СК.

Анализ кондуктивно-конвективного теплообмена в плоской воздушной прослойке, интенсивность которого только за счет теплопроводности, то есть при $Ra < Ra_{кр}$, описывается формулой $Nu = 1$, а в диапазоне конвекции $Ra \geq Ra_{кр}$ формулой $Nu = 1 + 1,446 (1 - Ra_{кр}/Ra)$, показал, что в диапазоне $Ra < Ra_{кр}$ график этой зависимости — прямая, параллельная оси абсцисс. В точке $Ra = Ra_{кр}$ имеет место излом графика $Nu = f(Ra)$, причем производная dNu/dx (переменная $x = Ra/Ra_{кр}$) в этой точке максимальна и равна $dNu/dx = 1,446$. При $Ra \geq Ra_{кр}$ число $Nu = f(Ra)$ монотонно растет, асимптотически приближаясь к значению $\lim(Nu) = 2,446$. Таким образом, результаты анализа традиционного описания теплообмена не дают ответа на вопросы, существует ли проблема оптимизации данной конструкции и если да, то каково значение оптимальных параметров и каковы теплотери через воздушный зазор в этих случаях.

Результаты исследования

1. Термическая проводимость горизонтальных воздушных прослоек. В воздушной прослойке между стеклом и поверхностью абсорбера СК имеет место сложный теплообмен, включающий радиационную и кондуктивную (или конвективную) составляющие. Поскольку они практически независимы, то суммарный тепловой поток от абсорбера к стеклу можно записать следующим образом:

$$Q_{\Sigma} = \bar{\varepsilon} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) + \alpha (T_1 - T_2),$$

где $\bar{\varepsilon}$ — приведенная степень черноты системы стекло — абсорбер; σ_0 — постоянная Стефана — Больцмана; α — термическая проводимость воздушной прослойки, $\alpha = Nu (\lambda/h)$ (в режиме теп-

лопередачи теплопроводностью $Nu = 1$, а в режиме конвекции $Nu > 1$); λ — теплопроводность воздуха; h — расстояние между стеклом и абсорбером (ширина полосы); T_1, T_2 — абсолютные температуры поверхности абсорбера и стекла.

Эту формулу можно переписать через термические проводимости:

$$Q_{\Sigma} = 4 \bar{\varepsilon} \sigma_0 \bar{T}_{12}^3 (T_1 - T_2) + \alpha (T_1 - T_2) = (4 \bar{\varepsilon} \sigma_0 \bar{T}_{12}^3 + \alpha) (T_1 - T_2).$$

Здесь выражение в скобках — сумма двух термических проводимостей: радиационной ($\bar{T}_{12}^3 \cong [(T_1 + T_2)/2]^3$) и конвективной.

Анализ этой формулы показывает, что для проведения оптимизации АКС в рамках кондуктивно-конвективной составляющей следует исследовать не саму зависимость $Nu = f(Ra)$, а зависимость от h термической проводимости воздушной прослойки $\alpha = f(h)$.

Для термической проводимости плоской горизонтальной воздушной прослойки получаем:

$$\alpha = (\lambda/h) [1 + 1,446 (1 - Ra_{кр}/Ra)] = (\lambda/h) \{1 + 1,446 (1 - (h_{кр}/h)^3)\}.$$

Очевидно, здесь надо вычислить производную $d\alpha/dh$ в области, примыкающей к критической точке, и проанализировать ее знак. Производная максимальна при $h \geq h_{кр}$, то есть даже при небольшом увеличении Ra число Nu быстро увеличивается, но далее с увеличением Ra величина производной $d\alpha/dh$ уменьшается до нуля, для нахождения положения которого необходимо исследовать на экстремум полученную зависимость в диапазоне $(0-3 Ra_{кр})$ анализом текущих значений производной $d\alpha/dh$ ($Ra \sim h^3$). Запишем выражение термической проводимости в безразмерном виде:

$$K = \alpha/\alpha_{кр} = (h_{кр}/h) \{1 + 1,446 [1 - (h_{кр}/h)^3]\} = \delta^{-1} [1 + 1,446 (1 - \delta^{-3})].$$

Для того, чтобы исследовать это выражение на экстремум, надо приравнять к нулю его производную $dK/d\delta = 0$ (где δ — безразмерная толщина воздушной прослойки, $\delta = h/h_{кр}$). В итоге получаем $\delta_{опт} = 4/3$.

В результате проведенного анализа установлено, что в точке $Ra = Ra_{кр} = 1708$ наблюдается минимум термической проводимости прослойки $\alpha_{мин} = \alpha_{кр} = (\lambda/h_{кр})$. Так, при $Ra < Ra_{кр}$ производная $d\alpha/dh < 0$, а при условии $Ra > Ra_{кр}$ производная $d\alpha/dh > 0$. В особой точке, при $Ra = 4040$ ($\delta_{опт} = 4/3$), очевидно, имеет место экстремум функции (максимум термической проводимости), поскольку для нее соблю-

дается условие $d\alpha/dh = 0$. В этой точке $Nu = 1,836$ и $\alpha_{max} = 1,377 \alpha_{кр} = 1,377 (\lambda/h_{кр})$. При $Ra > 4040$ термическая проводимость воздушной прослойки медленно снижается и при $Ra \cong 3 Ra_{кр}$ ($\delta = 1,442$) достигает значения $\alpha = 1,36 \alpha_{кр}$. С повышением числа Ra в горизонтальной прослойке начинается неупорядоченный режим ламинарной конвекции, который продолжается вплоть до $Ra \cong 13 Ra_{кр}$, термическая проводимость α при этом монотонно снижается до $\alpha = 1,06 \alpha_{кр}$. При $Ra > 13 Ra_{кр}$ развивается турбулентная конвекция.

Пример 1. Оценим критическую толщину плоской воздушной прослойки в коллекторе БЗОО для разных углов наклона СК1 (0, 30 и 45°). Примем такие температуры элементов СК, ограничивающих воздушный зазор, °С: температура абсорбера — 65; температура стекла — 35. Для плоских воздушных прослоек между стеклом и абсорбером СК теплофизические свойства в выражении критерия Релея (β и ν) при небольшой разности температур ($T_1 - T_2$) можно рассчитать как средние арифметические: $\bar{\beta} = (\beta_1 + \beta_2)/2$ и $\bar{\nu} = (\nu_1 + \nu_2)/2$. В [3] для расчета коэффициента β использовали самое грубое приближение — среднеарифметическое: $(\bar{\beta})^{-1} = (\beta_1 + \beta_2)/2 = (T_1 + T_2)/2$. В этом случае $\bar{\beta} (T_1 - T_2) = 2 (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$. Однако эта формула не позволяет выразить разность температур T_1 и T_2 или их отношение в явном виде, что необходимо для расчетов.

Расчет критического зазора дал следующие результаты: $h_{кр} = 9,5$ мм ($\alpha_{кр} = 2,65$ Вт/К). С учетом угла наклона СК получаем: $h_{кр} = 9,5/(\cos \theta)^{1/3}$. Например, для $\theta = 30^\circ$ имеем $h_{кр} = 10$ мм, для $\theta = 45^\circ$ — $h_{кр} = 10,7$ мм.

2. Термическая проводимость замкнутых воздушных ячеек. При кондуктивной теплопередаче в замкнутых воздушных ячейках имеем $Nu = 1$ и $\alpha = \lambda/h$, при конвективной — $Nu = f(Ra)$. Для замкнутых воздушных ячеек значения $Ra_{кр}$ выше, чем для плоской прослойки, для них выше и возможный перепад температур $(T_1 - T_2)_{кр}$, поэтому среднеарифметическая аппроксимация осредненных значений $\bar{\beta}$ и $\bar{\nu}$ здесь уже не годится. Необходимо учитывать вид функциональной зависимости этих свойств от температуры. Первым на это обратил внимание Нуссельт [10], который предложил средние величины физических свойств, входящих в выражения критериев подобия, определять как среднеинтегральные: $\bar{\varphi}_{12} = [\int \varphi(T) dT]/(T_1 - T_2)$. Поскольку критерий Релея равен произведению $Gr \cdot Pr$, а число Прандтля для воздуха (в рабочем диапазоне температур СК) очень слабо изменяется с температурой, то его можно вынести за скобки

критерия Ra и рассмотреть отдельно: в этом случае $Pr \cong 0,71$ и $Ra \cong 0,71Gr$. Поэтому проанализируем только выражение критерия Грасгофа: $Gr = \beta \Delta T h^3 (g \cdot \cos \theta) / \nu^2$ (где $\Delta T = T_1 - T_2$; ν – кинематическая вязкость воздуха; θ – угол наклона СК к горизонту; β – интегральный коэффициент температурного расширения воздуха в диапазоне температур $T_1 - T_2$. Для идеального газа (в том числе воздуха при 1 атм и 25– 100 °С) дифференциальный коэффициент термического расширения $\beta \cong 1/T$ и $\beta_{12} = [\int \beta (T) dT] / (T_1 - T_2) = \ln(T_1/T_2) / (T_1 - T_2)$, а произведение $\beta \Delta T = \ln(T_1/T_2)$. В этом случае выражения критерия Рейля целесообразно выразить через критерий Галлея: $Ra = Gr \cdot Pr \cong Ga \cdot \cos \theta \cdot Pr \cdot \ln(T_1/T_2) \cong 0,71 Ga \cdot \cos \theta \cdot \ln(T_1/T_2)$.

Кинематическую вязкость воздуха ν в диапазоне температур от 0 до 100 °С можно аппроксимировать зависимостью $\nu(t) = \nu_0 \exp (k \cdot t)$, где для 0 °С $\nu_0 = 13,3 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент $k = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Теплопроводность воздуха при $p = 1$ атм линейно изменяется с температурой по зависимости $\lambda = \lambda_0 (1 + a t)$, где для 0 °С $\lambda_0 = 0,0243 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, коэффициент $a = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ [11].

Пример 2. Рассмотрим результаты тепловых испытаний СК1 БЗОО с АКС типа решетка из прозрачных полимерных полос, установленных в пространство между стеклом и абсорбером СК и образующих кубические ячейки, для которых значение критерия $Ra_{кр} = 6974$ (для горизонтального СК $h_{кр} = 15,2 \text{ мм}$, $\alpha_{кр} = 1,66 \text{ Вт}/\text{К}$).

Испытания СК1 БЗОО в рамках договора №631 «Совершенствование конструкций СК1...», проведенные на имитаторе НИИСТ, дали следующие результаты: $F'(\tau \cdot \alpha) = 0,89$, а $F' \cdot U_L = 11,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Приемочные ведомственные испытания СК1 в рамках договора М105/88 «Создать и освоить производство СК1...» показали, что установка сотовой АКС (типа решетка из прозрачной полимерной полосы) уменьшила $F' \cdot U_L$ СК1 БЗОО на 30,5 %, а селективное покрытие абсорбера типа черный хром снизило величину $F' \cdot U_L$ лишь на 21 %. При этом использование селективного покрытия привело к увеличению оптических потерь в 3 раза большему, чем установка АКС (то есть к снижению $F'(\tau \cdot \alpha)$ на 0,15 против 0,05 с АКС) [5].

Повышение эксергетической эффективности [12] СК1 БЗОО при использовании селективного покрытия типа черный хром (2) и установки АКС типа решетка из полимерных полос (3) такое:

- 1) исходный СК1:
 $(F' \cdot U_L) = 11,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $F'(\tau \cdot \alpha) = 0,89$;
 $K_{ex} = (0,89)^2 / (11,2) = 0,071 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;
- 2) СК1 с СПА:
 $(F' \cdot U_L) = 8,85 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $F'(\tau \cdot \alpha) = 0,74$;

$$K_{ex} = (0,74)^2 / (8,85) = 0,62 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} (-13 \%)$$

3) СК1 с АКС:

$$(F' \cdot U_L) = 7,78 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$
; $F'(\tau \cdot \alpha) = 0,84$;

$$K_{ex} = (0,84)^2 / (7,78) = 0,91 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} (+28 \%).$$

Таким образом, установка АКС типа решетка в воздушной прослойке СК1 между абсорбером и стеклом повысило его эксергетическую эффективность на 28 %, а использование селективного покрытия типа черный хром его абсорбера, наоборот, снизило эксергетическую эффективность СК1 на 13 %.

3. Расчет критических параметров АКС целевого типа.

При установке АКС по патенту [6] полосы непрерывной ленты из алюминиевой фольги образуют между абсорбером и стеклом СК систему каналов прямоугольного сечения, оси которых горизонтальны. Выражения $Ra_{кр}$ для таких каналов приведены выше. Из двух выражений выбираем то, которое соответствует высокотеплопроводным границам, поскольку и стекло и тем более материал абсорбера имеют достаточно высокую теплопроводность. Из взаимно однозначной зависимости (*) явно выразить можно только шаг полос АКС, поэтому запишем выражение для критического шага АКС $\delta_{кр}$ через число Рейля в таком виде:

$$\omega_{кр} = h \{ [(Ra/1708)^6 - 1] / 22 \}^{-1/2} = 4,69 h \{ [Ga \ln(T_1/T_2) \cos \theta / 2400]^6 - 1 \}^{-1/2}.$$

Для условий теплопередачи в воздушной прослойке СК, приведенных в примере 1, расчет по этой формуле критического шага $\omega_{кр}$ для значений ширины полос АКС $h_1 = 11 \text{ мм}$, $h_2 = 12 \text{ мм}$ и $h_3 = 13 \text{ мм}$ дает следующее: $(\omega_{кр})_1 = 14,3 \text{ мм}$; $(\omega_{кр})_2 = 6,9 \text{ мм}$; $(\omega_{кр})_3 = 3,6 \text{ мм}$. Анализ полученных результатов показал, что использование АКС, например, с шириной полос 13 мм и шагом 3,6 мм снижает термическую проводимость воздушной прослойки СК почти на 40 % по сравнению с ее критической проводимостью $\alpha_{кр}$ без АКС.

Аналогично можно рассчитать зависимость критического отношения граничных температур воздушной прослойки в АКС по заданным значениям ω и h в таком виде:

$$(T_1/T_2)_{кр} = \exp \{ (2400 / Ga \cdot \cos \theta) \times [1 + 22 (h/\omega)^2]^{1/6} \}.$$

Выводы

Оценку теплоизоляционных свойств воздушных прослоек и полостей некорректно проводить на основе приближенных обобщенных зависимостей без детального анализа механизма

теплообмена на границе теплопроводности и конвекции, поскольку это приводит к ошибочным результатам. Недостаточно проводить анализ теплообмена в зазоре и по результатам точных аналитических решений для конвекции воздуха в критериальном виде $Nu = f(Ra)$. Наиболее полную возможность оценки интенсивности теплообмена в воздушном зазоре дает не анализ безразмерных выражений в критериальном виде, а анализ размерного параметра — термической проводимости воздушной прослойки α .

Проведенный анализ показал, что наилучшими теплоизоляционными качествами, то есть минимальной термической проводимостью, обладают воздушные прослойки и полости в случае, когда их характерный размер приближается к критическому размеру снизу, то есть при $Ra \leq Ra_{кр}$. Напротив, максимальная термическая проводимость для горизонтальных воздушных прослоек при ламинарном режиме конвекции ($Ra_{кр} \leq Ra \leq 13 Ra_{кр}$) имеет место при $Ra = 4040$. Она оказалась почти на 38 % выше, чем минимальная $\alpha_{кр}$, для критического зазора.

Разработан метод расчета параметров щелевой антиконвективной структуры СК [6]. Получены аналитические выражения в явном виде для критической величины шага АКС ($\omega_{кр}$) и для критической величины отношения абсолютных температур $(T_1/T_2)_{кр}$ границ воздушной прослойки между стеклом и абсорбером. Проведен расчет нескольких вариантов щелевой АКС, который показал, что установка в воздушную прослойку СК такой структуры может существенно увеличить ее термическое сопротивление.

Особенно перспективным представляется сочетание установки антиконвективной структуры с селективным покрытием поверхности абсорбера СК, поскольку в этом случае снижаются обе составляющие теплопотерь от абсорбера СК через стекло в окружающую среду (и радиационная, и конвективная). Однако селек-

тивное покрытие при этом не должно понижать эксергетическую эффективность СК.

Работа выполнена при поддержке Украинского научно-технологического центра (проект УНТЦ 3984).

Список литературы

1. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. — М. : Мир, 1977. — 420 с.
2. Агнихотри О., Гупта Б. Селективные поверхности солнечных установок. — М. : Мир, 1984. — 277 с.
3. Мышко Ю.Л., Мойсеенко В.В., Смирнов С.И., Смирнов С.В. Оптимизация толщин воздушного зазора и тыльной тепловой изоляции плоского солнечного коллектора // Гелиотехника. — 1991. — № 1. — С. 15–18.
4. Вейнберг В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии. — М. : Оборонгиз, 1959. — 253 с.
5. Луданов К.И. Антиконвективная структура солнечного коллектора // Тез. докл. VI конф. Минэнерго «НВИЭ-97», пгт Николаевка, АР Крым, 1–6 сент. 1997 г. — С. 25.
6. Пат. 13183 Укр., МКІ6 F 24 J 2/24. Соячный коллектор з антиконвективною структурою / К.І.Луданов. — Оpubл. 1997, Бюл. № 1.
7. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. — М. : Наука, 1972.
8. Голицын Г.С. Исследование конвекции с геофизическими приложениями и аналогиями. — Л. : Гидрометеоиздат, 1980.
9. Справочник по теплообменникам / Пер. под ред. Б.С.Петухова и В.К.Шикова. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
10. Соковишин Ю.А., Мартыненко О.Г. Введение в теорию свободноконвективного теплообмена. — Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1982.
11. Ковалевский В.И., Бойков Г.П. Методы теплового расчета экранной изоляции. — М. : Энергия, 1974. — 200 с.
12. Луданов К.И. Эксергетическая эффективность солнечных коллекторов // Эко-технологии и ресурсосбережение. — 2006. — № 5. — С. 68–71.

Поступила в редакцию 22.04.09

The Parameters Calculation of Solar Collector Anticonvection Structure

Ludanov K.I.

Institute for Problems of Material Science of NASU, Kiev

Heat exchange in the plane air interlayers is investigated. The computation method of «aperture» anticonvection structure of solar collector is developed. The analytic expression for critical step of the «aperture» anticonvection structure is obtained depending on its bandwidth, absolute temperatures of absorber and glass surfaces ratio and on the solar collector slope angle.

Key words: solar collector, heat loss coefficient, anticonvection structure, thermal conductivity.

Received April 22, 2009