

Multifunctional Solar Systems Based On Two-Stage Regeneration Absorbent Solution

Doroshenko A.V., Antonova A.R., Garh Saed

*Educational and Research Institute of Refrigeration, Criotehnology and Eco-Energetics
Odessa National Academy of Food Technologies, Ukraine*

Abstract. The concepts of multifunctional dehumidification solar systems, heat supply, cooling, and air conditioning based on the open absorption cycle with direct absorbent regeneration developed. The solar systems based on preliminary drainage of current of air and subsequent evaporated cooling. The solar system using evaporative coolers both types (direct and indirect). The principle of two-stage regeneration of absorbent used in the solar systems, it used as the basis of liquid and gas-liquid solar collectors. The main principle solutions are designed for the new generation of gas-liquid solar collectors. Analysis of the heat losses in the gas-liquid solar collectors, due to the mechanism of convection and radiation is made. Optimal cost of gas and liquid, as well as the basic dimensions and configuration of the working channel of the solar collector identified. Heat and mass transfer devices, belonging to the evaporative cooling system based on the interaction between the film and the gas stream and the liquid therein. Multichannel structure of the polymeric materials used to create the tip. Evaporative coolers of water and air both types (direct and indirect) are used in the cooling of the solar systems. Preliminary analysis of the possibilities of multifunctional solar absorption systems made reference to problems of cooling media and air conditioning on the basis of experimental data the authors. Designed solar systems feature low power consumption and environmental friendliness.

Keywords: Multifunctional systems, solar energy, solar collectors, regeneration, evaporative cooling, polymeric materials.

Sistemele multifuncionale solare bazate pe regenerare cu două trepte a soluției absorbentului

Doroshenko A.V., Antonova A.R., Garh Saed Ali Ahmo Hande

*Institutul de Cercetări frigorifice educaționale și, Criotehnology și Eco-Energetică
Odessa Academia Națională de Tehnologii Alimentare, Ucraina*

Odesa, Ucraina

Rezumat. Sunt elaborate schemele principale ale sistemelor multifuncionale solare de uscare a aerului, de termoficare, de climatizare pe baza ciclului deschis absorbțional cu regenerare pentru generație nouă a colectoarelor solare de tip „gas-lichid”. Este efectuată analiza pierderilor de căldură în colectoarele menționate, care sunt condiționate de mecanisme de convecție și de radiație. Deasemenea sunt determinate debitele optime de gaze și de lichid și dimensiunile principale și configurația a canalului de cucru a colectorului solar. Aparatele de schimb cu căldură și cu masă, care fac parte a sistemul de racire evaporativă, sunt bazate pe interacțiune peliculară a fluxurilor de gas și de apă în ele. Pentru crearea duzei sunt utilizate structurile cu multe canale fabricate din materialele polimerice. În partea ce răcire a sistemelor solare sunt utilizate materialele polimerice. În partea de răcire a sistemelor solare sunt utilizate evaporatoarele de răcire a aerului și apei de tip direct și indirect. Pe baza de date experimentale, obținute de autorii analiza prealabilă a posibilităților sistemelor cercetate referitor la analiza problemelor de răcire a mediilor și pentru climatizare a aerului. Sistemele elaborate au consumul de energie scăzut și sunt ecologice..

Cuvinte-cheie: energie solară, regenerare, răcire evaporativă, colectoarele solare.

Многофункциональные солнечные системы на основе двухступенчатой регенерации раствора абсорбента

Дорошенко А.В., Антонова А.Р., Гарх Саед

*Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина*

г. Одесса, Украина

Аннотация. Разработаны принципиальные схемы многофункциональных солнечных систем осушения воздуха, теплоснабжения, хладоснабжения и кондиционирования для нового поколения газо-жидкостных солнечных коллекторов. Выполнен анализ тепловых потерь в коллекторах, обусловленных механизмами конвекции и радиации, и определены оптимальные расходы газа и жидкости, а также основные размеры и конфигурация рабочего канала солнечного коллектора. Тепломассообменные аппараты, входящие в систему испарительного охлаждения, основаны на пленочном взаимодействии потоков газа и жидкости и в них, для создания насадки, используются многоканальные структуры из полимерных материалов. В охлаждающей части солнечных систем используются испарительные охладители воды и воздуха как

прямого, так и непрямого типов. Выполнен, на основе экспериментальных данных авторов, предварительный анализ возможностей многофункциональных солнечных абсорбционных систем применительно к задачам охлаждения сред и кондиционирования воздуха. Разработанные солнечные системы отличаются малым потреблением энергии и экологической чистотой.

Ключевые слова: многофункциональные системы, солнечная энергия, солнечные коллекторы, регенерация, испарительное охлаждение, полимерные материалы.

СОКРАЩЕНИЯ

ОГАХ	Одесская государственная академия холода
ТМА	тепломассообменный аппарат
ПН	подвижная насадка; трехфазный слой «газ-жидкость-твердое тело»
СХС	солнечная холодильная система
ССКВ	солнечная система кондиционирования воздуха
ССГВ	солнечная система горячего водоснабжения
Solar / IECg, Solar / IECw	солнечная система с воздухо- и водоохладителем непрямого типа Solar liquid-desiccant cooling and air conditioning systems (Solar / IECg) Solar liquid-desiccant cooling systems (Solar / IECw)
АБР (ABR)	абсорбер
ДБР (DBR)	десорбер
НИОг (IECg)	испарительный воздухоохладитель непрямого типа
НИО-Rг (IEC-Rg)	испарительный воздухоохладитель регенеративного типа
НИОж (IECw)	испарительный водоохладитель непрямого типа
П, В и О	полный, основной и вспомогательный воздушные потоки
М, N	крепкий и слабый раствор абсорбента
ГПНт (CTW)	градирня технологического назначения
СКж (SCw)	солнечный жидкостной коллектор
т/к	теплообменник
ж (l)	Жидкость (вода, раствор абсорбента) (liquid)
из (iz)	изоляция (insulation)
г (g)	газ-воздух (gas)
БА	бак-теплоаккумулятор
$t_n, h_n, t_o, h_o, t_b, h_b,$	температура и энтальпия полного, основного и вспомогательного воздушных потоков
х, г/кг	влажность
ОВ	охлажденный воздух
ОС (ee)	окружающая среда (external environment)
НБ (wl)	небосвод (welkin)
ВП (tc)	верхнее покрытие (top cover)
НП (dc)	нижнее покрытие
НВ (og)	наружный воздух (outdoor gas)
ВВ	выбрасываемый в среду воздух
ОРР	опорно-распределительная решетка

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные системы осушительно-испарительного типа на основе открытого абсорбционного цикла разрабатываются как с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента [1,8], так и с непрямой регенерацией [1-10]. Прямая регенерация абсорбента снижает температурный уровень

регенерации до температур не превышающих 70°C, что обеспечивает возможность построения солнечных систем на основе плоских солнечных коллекторов-регенераторов и устраняет необходимость в десорбере традиционного типа.

1. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ СХЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ АБСОРБЕНТА

В приложении к задачам осушения воздуха, кондиционирования воздуха (солнечные системы кондиционирования воздуха ССКВ) и охлаждения сред (солнечные холодильные системы СХС) на основе открытого абсорбционного цикла и прямой (непосредственной) солнечной регенерации абсорбента разработаны новые принципиальные схемные решения, базирующиеся на принципе снижения зависимости основных характеристик солнечной системы от естественных колебаний солнечной активности. Солнечные системы с прямой (непосредственной) солнечной регенерацией раствора абсорбента, обеспечивающие снижение габаритов, массы и стоимости систем, оказываются очень чувствительны к влиянию уровня солнечной активности, так как в них трансформация солнечной энергии обеспечивает одновременно и требуемый температурный уровень регенерации абсорбента в процессе диффузии водяных паров в регенерационный воздушный поток, так и само движение воздуха над поверхностью абсорбента (растворы на основе бромистого лития LiBr). Солнечные системы построены на основе двухступенчатой схемы регенерации и теперь включают два основных блока (рис. 1-2):

- Блок предварительного осушения воздуха, включающий абсорбер-осушитель АБР (5), обеспечивающий непрерывность цикла осушения воздуха;

- Десорбер-регенератор абсорбента, поддерживающий восстановление концентрации абсорбента и непрерывность основного цикла:

- в составе жидкостного солнечного коллектора СКж, SCw (солнечная система горячего водоснабжения ССГВ, 1) для предварительного подогрева слабого раствора абсорбента и газо-жидкостного солнечного коллектора СК/г-ж, SCg-liq (3), обеспечивающего восстановление концентрации абсорбента (рис. 1);

- в составе коллектора СКж, SClіq (1), где в каналах теплоприемника непосредственно подогревается раствор абсорбента и газо-жидкостного солнечного коллектора

СК/г-ж, SCg-liq, обеспечивающего восстановление концентрации абсорбента (рис. 2);

- Блок испарительного охлаждения воздуха в испарительном охладителе прямого типа ПИО (5, рис. 1), либо испарительного охлаждения воды в градирне ГРДпр (7, рис. 2).

На рис. 1-2 приведены разработанные схемные решения солнечных систем. Рассмотрим работу ССКВ на примере схемы, представленной на рис. 1. В качестве основных элементов осушительный блок установки включает абсорбер 5 (осушитель воздуха), солнечную систему регенерации абсорбента ССРГ, состоящую из набора требуемого числа солнечных жидкостных коллекторов СКж (1) и коллекторов-регенераторов абсорбента СК/г-ж (3), включенных последовательно, а также емкость для «крепкого» раствора абсорбента (бак-накопитель 4). Охлаждение абсорбера обеспечивается автономной вентиляторной градирней ГРНт (градирня технологического назначения, 7). Охлаждение абсорбера, в котором, в процессе поглощения влаги из осушаемого воздуха, выделяется тепло, обеспечивает приближение к изотермичности процесса абсорбции и повышает эффективность процесса и всей схемы в целом [1]. В схеме охлаждения абсорбера может использоваться вынесенный теплообменник 8, либо это специальный водоохлаждаемый абсорбер с внутренним расположением теплообменника, сопряженный в работе с градирней технологического назначения ГРДт. Предварительный подогрев «слабого» раствора абсорбента, поступающего на регенерацию в газо-жидкостные солнечные коллекторы СК/г-ж здесь обеспечивается солнечной системой теплоснабжения ССГВ на основе плоских солнечных коллекторов СКж (позиция 1, и бак-теплоаккумулятор БТА, позиция 2), ранее разработанных в ОГАХ на основе полимерных материалов [1,10]. Охлаждающий блок ССКВ включает испарительный охладитель воздуха прямого типа ПИО (6). Воздушный поток (свежий наружный воздух), при осушении в абсорбере 5, снижает влагосодержание x_2 и температуру точки росы t_{mp} , что обеспечивает значительный потенциал последующего охлаждения в испарительном охладителе.

Работа альтернативной системы может быть организована как по вентиляционной,

так и по рециркуляционной схемам и, в последнем случае, часть воздушного потока на входе в абсорбер 5 (а также между абсорбером и испарительным воздухоохладителем ПИО) является воздухом, покидающим кондиционируемое помещение (рециркуляционный воздушный контур ПИР по рис.1).

Особый интерес для систем охлаждения сред СХС и кондиционирования воздуха ССКВ представляет схема на рис. 2, где в качестве испарительного охладителя дополнительно используется продуктовая градирня ГРДпр (7). Воздух, осушенный в абсорбере 5 и имеющий низкую температуру точки росы, поступает в градирню ГРНпр, где обеспечивается глубокое охлаждение воды, которая может использоваться в вентилируемых теплообменниках-охладителях (10), устанавливаемых непосредственно в кондиционируемых помещениях (9), либо холодильных камерах. Охладительный блок в этом случае может располагаться вне кондиционируемых помещений и здания. Воздушный поток «В», покидающий низкотемпературную «продуктовую» градирню, может использоваться для охлаждения воздуха после абсорбера перед градирней в теплообменнике т/о III (8).

Таким образом, в разработанных схемах используются два типа солнечных коллекторов, СКж (SCw, либо SClig) и СКг-ж (SCg-liq). Жидкостной СКж (рис. 3А) используется для предварительного подогрева слабого раствора абсорбента после абсорбера, направляемого в солнечный коллектор регенератор СК/г-ж (рис. 3Б), а также для нужд горячего водоснабжения обслуживаемого объекта (схема по рис. 1), либо для непосредственного подогрева раствора абсорбента перед подачей в СК/г-ж (схема по рис. 2).

II. ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНЫХ ГАЗО-ЖИДКОСТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ-РЕГЕНЕРАТОРОВ СК/г-ж. АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ

В СК/г-ж, прозрачное покрытие (ПП) выполнено из полимерной многоканальной плиты, имеющей сотовую структуру (рис. 3-4). Такая плита может рассматриваться как обычное двойное прозрачное покрытие, образованное двумя эквидистантно

расположенными полимерными пластинами с воздушным зазором между ними (100-120 мм), а сам СК/г-ж, таким образом, представляет собой солнечный коллектор с двойным прозрачным покрытием. Хорошо известно, что использование двойного ПП существенно снижает величину суммарного коэффициента потерь как в СКж, так и в СКг-ж [1], но обычно применяемое двойное ПП в виде двойного остекления приводит к росту веса и габаритов СК и усложняет конструкцию коллектора в целом. Использование многоканальной полимерной плиты практически не изменяет эти показатели, играя в то же время традиционную роль «двойного остекления» [10].

Теплоприемник (абсорбер) солнечного коллектора-регенератора абсорбента СК/г-ж (рис. 3-4) имеет U-образную форму, 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» коллектора под воздействием сил гравитации. Нагрев воздушного потока обеспечивает его движение через воздушный канал СК/г-ж (в безвентиляторном варианте). Нагрев абсорбента обеспечивает необходимые условия для реализации процесса десорбции (удаления водяных паров из раствора, диффузии паров в воздушный поток и выноса водяных паров в окружающую среду). Ребра прозрачного покрытия ПП для повышения жесткости изделия расположены перпендикулярно ребрам-перегородкам теплоприемного канала. Дно канала СК/г-ж выполнено плоским и гладким, либо оребренным образом профилировано вдоль течения жидкостной пленки, что позволяет увеличить смоченную поверхность и интенсифицирует процессы теплообмена при регенерации абсорбента.

Распределение температур каждого элемента СК/г-ж, включая теплоносители, определяем на основании уравнений теплового баланса [1]. 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. Характерная тепловая цепь для СК/г-ж приведена на рис. 4.

Для наружной поверхности коллектора со стороны прихода солнечной энергии (покрытие ВП – ОС, индексы: НБ – небосвод; ОС – окружающая среда, ВП – верхнее прозрачное покрытие), можно использовать зависимости:

$$\begin{aligned} q_{ic-ee} &= (\alpha_{ic-ee}^k + \alpha_{ic-ee}^p) \cdot F_{ck} \cdot (T_{ic} - T_{ee}) = \\ &= (T_{ic} - T_{ee}) / R_5 \\ \alpha_{ic-ee}^k &= 5,7 + W_{og} \\ \alpha_{ic-ee}^p &= \varepsilon_n \cdot \sigma \cdot (T_{ic} + T_{ee}) \cdot (T_{ic}^2 + T_{ee}^2) \cdot \\ &\cdot [(T_{ic} - T_{ee}) / (T_{ic} - T_w)] \end{aligned} \quad (1)$$

где α^k и α^p – конвективная и радиационная составляющие коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·К); W_{og} – скорость воздушного потока над верхним покрытием коллектора, м/с; ε_n – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м⁴·град²); R_5 – термическое сопротивление на рассматриваемом участке ВП – ОС.

Для всех внутренних полостей коллектора: – покрытия НП – ВП, воздушного зазора в многоканальной полимерной плите ПП, приняты индексы: ВП – верхнее прозрачное покрытие; НП – нижнее прозрачное покрытие; – А – НП, индексы: НП – нижнее прозрачное покрытие; А – верхняя поверхность абсорбера, можно использовать зависимости:

$$\begin{aligned} q_{dc-ic} &= (\alpha_{dc-ic}^k + \alpha_{dc-ic}^p) \cdot F_{ck} \cdot (T_{dc} - T_{ic}) = \\ &= (T_{dc} - T_{entc}) / R_4 \\ \alpha_{dc-ic}^k &= [1 - 0,0018 \cdot (T_{dc} / 2 + T_{ic} / 2)] \cdot \\ &[1 - (\beta - 45 \cdot (0,00259 - 0,00144\varepsilon_{ic})) \cdot \\ &1,14 \cdot (T_{dc} - T_{ic})^{0,31} / \delta_{dc-ic}^{0,07}] \cdot \\ \alpha_{dc-ic}^p &= \sigma \cdot (T_{dc} + T_{ic}) \cdot (T_{dc}^2 + T_{ic}^2) / \\ &/ (1 / \varepsilon_{dc} + 1 / \varepsilon_{ic}) \\ q_{a-dc} &= (\alpha_{a-dc}^k + \alpha_{a-dc}^p) \cdot F_{ck} \cdot (T_a - T_{dc}) = \\ &= (T_a - T_{dc}) / R_3 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{a-mdc}^k &= [1 - 0,0018 \cdot (T_a / 2 + T_{dc} / 2)] \cdot \\ &[1 - (\beta - 45 \cdot (0,00259 - 0,00144\varepsilon_{dc})) \cdot \\ &1,14 \cdot (T_a - T_{dc})^{0,31} / \delta_{a-dc}^{0,07}] \cdot \\ \alpha_{a-dc}^k &= 5,7 + W_{og} \text{ (в зависимости от} \\ &\text{величины } W_{og}) \\ \alpha_{a-dc}^p &= \sigma \cdot (T_a + T_{dc}) \cdot (T_a^2 + T_{dc}^2) / \\ &(1 / \varepsilon_a + 1 / \varepsilon_{dc}) \end{aligned} \quad (3)$$

где β – угол наклона СК/г-ж к горизонту, град; δ_{a-dc} – 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 следует использовать одно из двух приведенных уравнений для расчета величины α_{a-dc}^k . Термическое сопротивление R_l (А – ИЗ) определяется теплопроводностью выбранного материала теплоизоляции. Для наружной поверхности коллектора со стороны дна (ИЗ – ОС) можно использовать формулы:

$$\begin{aligned} q_{iz-ee} &= (\alpha_{iz-ee}^k + \alpha_{iz-ee}^p) \cdot F_{ck} \cdot (T_{iz} - T_{ee}) = \\ &= (T_{iz} - T_{ee}) / R_2 \\ \alpha_{iz-ee}^k &= 5,7 + W_{og} \\ \alpha_{iz-ee}^p &= \varepsilon_n \cdot \sigma \cdot (T_{iz} + T_{ee}) \cdot (T_{iz}^2 + T_{ee}^2) \cdot \\ &\cdot [(T_{iz} - T_{ee}) / (T_{iz} - T_w)] \end{aligned} \quad (4)$$

В формулах 1 - 4 использоваться следующие обозначения: α_{a-l}^k , α_{a-dc}^k , α_{dc-ic}^k , α_{ic-ee}^k , α_{iz-ee}^k – конвективные составляющие теплоотдачи от боковых и нижней поверхности пластины теплоприемника (абсорбера) к жидкости (теплоносителю, в данном случае к раствору абсорбента); тепловых потерь от боковых поверхностей пластины теплоприемника (абсорбера) и поверхности жидкости в воздушной части рабочего канала СК/г-ж (А – НП); потерь между нижней и верхней поверхностью прозрачного покрытия (НП – ВП); потерь с поверхности прозрачного покрытия в окружающую среду (ВП – ОС); потерь от «дна» теплоизоляции в окружающую среду (ИЗ – ОС) Вт/(м²·К). Соответственно α_{a-dc}^p , α_{dc-ic}^p , α_{ic-ee}^p , α_{iz-ee}^p – радиационные

составляющие тепловых потерь, Вт/(м²·К); α_i – коэффициент теплоотдачи от стенки U-образного канала к жидкости, Вт/(м²·К), (обычно в расчетах принимают величину $\alpha_i \approx 300$ для естественной и ≈ 1500 для вынужденной конвекции. Термические коэффициенты потерь для СК/г-ж определяется формулой:

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

Основное значение, при правильном выборе типа и расчета толщины теплоизоляции, имеют термические сопротивления на участках R_3 , R_4 , и R_5 , определяющие тепловые потери коллектора-регенератора.

Ранее, в работе [2-5] нами было выполнено сравнительное исследование двух вариантов СК/г-ж, с «естественной» тягой и вентилируемого коллектора. Рабочий канал теплоприемника (абсорбера) невентилируемого СК/г-ж был выполнен из набора U-образных элементов на основе алюминиевого листа, что было обусловлено необходимостью равномерного прогрева воздушного потока. Рабочее пространство теплоприемника (абсорбера) вентилируемого СК/г-ж организовано в виде единого канала (рис. 4 и 5) с черновым покрытием внутренней полости и профилированием «дна», по которому гравитационно стекает пленка раствора абсорбента. Ширина канала δ_{1-1} составляла 1000мм, при варьируемой высоте $\delta_{1-2} = 100 - 150$ мм в обоих сравниваемых вариантах СК/г-ж. Для вентилируемого варианта СК/г-ж уровень суммарных тепловых потерь несколько возрастает сравнительно с вариантом с естественной тягой, что обусловлено ростом конвективных потерь. Как показали предварительные исследования, вариант СК/г-ж с «естественной» тягой очень зависим от колебаний солнечной активности и, в первую очередь, это касается расхода воздушного потока через СК. Предпочтительным оказывается вентилируемый вариант СК/г-ж, которому в дальнейшем и было отдано предпочтение.

На рис. 5 приведены результаты расчетов тепловой эффективности (коэффициента суммарных тепловых потерь) для разработанного СК/г-ж в вентилируемом

сопротивления основных элементов СК/г-ж определяют коэффициент потерь по формуле $U_i = 1/R_i$, где U_i – коэффициент потерь на каждом участке СК, Вт/(м²·град); R_i – термическое сопротивление на каждом участке СК, (м²·К)/Вт. Величина суммарного варианте, для исходных параметров: $t_a = 50^\circ\text{C}$ и угла наклона СК $\beta = 30^\circ$. В расчетах варьировали высоту рабочего канала $\delta_{1-2} = 100-150$ мм, при ширине канала $\delta_{1-1} = 1000$ мм; высоту ПП в диапазоне: $\delta_{2-3} = 10 - 40$ мм, при ширине канала ПП $\delta_{2-2} = 10$ и 25мм (размеры ячейки прозрачного покрытия СК); толщину теплоизоляции дна коллектора, исходя из начальной величины $\delta_{iz} = 30$ мм, при $\lambda_{iz} = 0,04$ Вт/(м²·К).

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 (неорошенной) поверхности теплоприемника. Рабочий канал теплоприемника (абсорбера) СК/г-ж имеет черновое покрытие внутренней полости и профилирование «дна», по которому гравитационно стекает пленка раствора абсорбента. Профилирование выполнено в двух основных вариантах:

– поперечное профилирование в виде регулярной шероховатости (РШ) поверхности дна теплоприемника с параметрами $k = p/e = 5 - 50$, где p и e , соответственно, шаг и высота выступа РШ [1];

– продольное профилирование с параметрами $k^* = p^*/e$, где p^* и e^* , соответственно, шаг и глубина профилирования в направлении течения жидкостной пленки.

Результаты расчетов, приведенные на рис. 5Г показывают, что профилирование «дна» теплоприемника СК/г-ж позволяет снизить уровень тепловых потерь, причем предпочтительным является вариант продольного профилирования дна с параметрами профилирования $k^* = p^*/e^* = 2,5 - 7,5$. Во всех сравниваемых вариантах оформления дна теплоприемника

оптимальная высота рабочего канала составляет $\delta_{1-2} = 120-140$ мм.

Влияние параметров прозрачного покрытия СК/г-ж представлено на рис. 5Б. При увеличении δ_{2-3} от 10 до 25 мм, величина U_{Σ} уменьшается в среднем от 10 до 9.9 Вт/м²К, и с дальнейшим ростом воздушного зазора δ_{2-3}

поскольку число вертикальных прозрачных перегородок в составе ПП при этом растет. Величины $\delta_{2-3} = 20-25$ мм и $\delta_{2-2} = 20-50$ мм (высота и ширина ячейки ПП) можно считать оптимальными для формирования прозрачного покрытия СК/г-ж.

С увеличением толщины теплоизоляции $\delta_{из}$ коэффициент тепловых потерь монотонно уменьшается (рис. 5В). По всей видимости, использовать СК/г-ж с толщиной теплоизоляции $\delta_{из} > 30$ мм нецелесообразно, т. к. при этом U_{Σ} уменьшается незначительно, а материальные затраты и габариты коллектора существенно растут.

Серьезный практический интерес представляет оценка влияния скорости ветра над поверхностью ПП (в известной мере и под дном СК/г-ж, но здесь влияние погашается наличием правильно рассчитанной теплоизоляции) на коэффициент тепловых потерь, а, следовательно, и на к.п.д. СК (рис. 5А). При изменении $w_{Г}$ от 0 до 5 м/с, величина U_{Σ} увеличивается наиболее существенно. Из этого следует, что вопреки существующим рекомендациям, скорость ветра в месте установки солнечной системы 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.

III. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ РАЗРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ СХС

На рис. 6 на Н-Т диаграмме влажного воздуха приведен, на основании полученных авторами результатов по эффективности процессов в основных элементах солнечных систем, общий анализ принципиальных возможностей разработанных СХС в основном для

практически остается постоянной. Влияние ширины канала δ_{2-2} сказывается преимущественно на ухудшении оптических свойств прозрачного покрытия (увеличение суммарного отражения проходящей солнечной энергии вертикальными перегородками), выполненного из многоканальной полимерной плиты, случаев, когда $x_g^1 > 12,5$ г/кг (для континентального климата характерна именно эта ситуация).

В расчетах использовался абсорбент на основе бромистого лития LiBr [1]. Для достижения требуемой движущей силы в СХС требуемая концентрация LiBr должна составлять 60-65%, т.е. линия процесса находится очень близко к линии кристаллизации в интервале температур 30-60°C. В настоящее время разрабатываются новые многокомпонентные рабочие вещества (композиты) с повышенной растворимостью и сниженной коррозионной активностью. В качестве добавок используются LiNO₃, ZnCl₂, CaBr₂, LiI и другие составляющие.

Приведен анализ принципиальных возможностей разработанных СХС (формула АБР-ГРД с регенерацией абсорбента в СК/г-ж) в зависимости от начальных параметров наружного воздуха: $x_{ог}^1 = 10$ и 15 г/кг (при $t_{ог}^1 = 35^{\circ}\text{C}$). Эти условия охватывают всю территорию Европы. Поскольку вспомогательный воздушный поток покидает ГРДпр холодным, но увлажненным ($\phi = 90\%$) можно его использовать для охлаждения воздуха, покидающего абсорбер, что существенно увеличивает возможности СХС. Это несколько усложняет систему и увеличивает энергозатраты на движение теплоносителей. Такое решение благоприятно с точки зрения опасности реконденсации влаги и существенного падения эффективности, причем эта опасность значительно возрастает с понижением общего уровня охлаждения.

Получены результаты:

Параметры А: $t_{ог}^1 35^{\circ}\text{C}$, $t_{М}^1 24^{\circ}\text{C}$, $t_{п}^1 20^{\circ}\text{C}$, $x_{ог}^1 15$ г/кг:

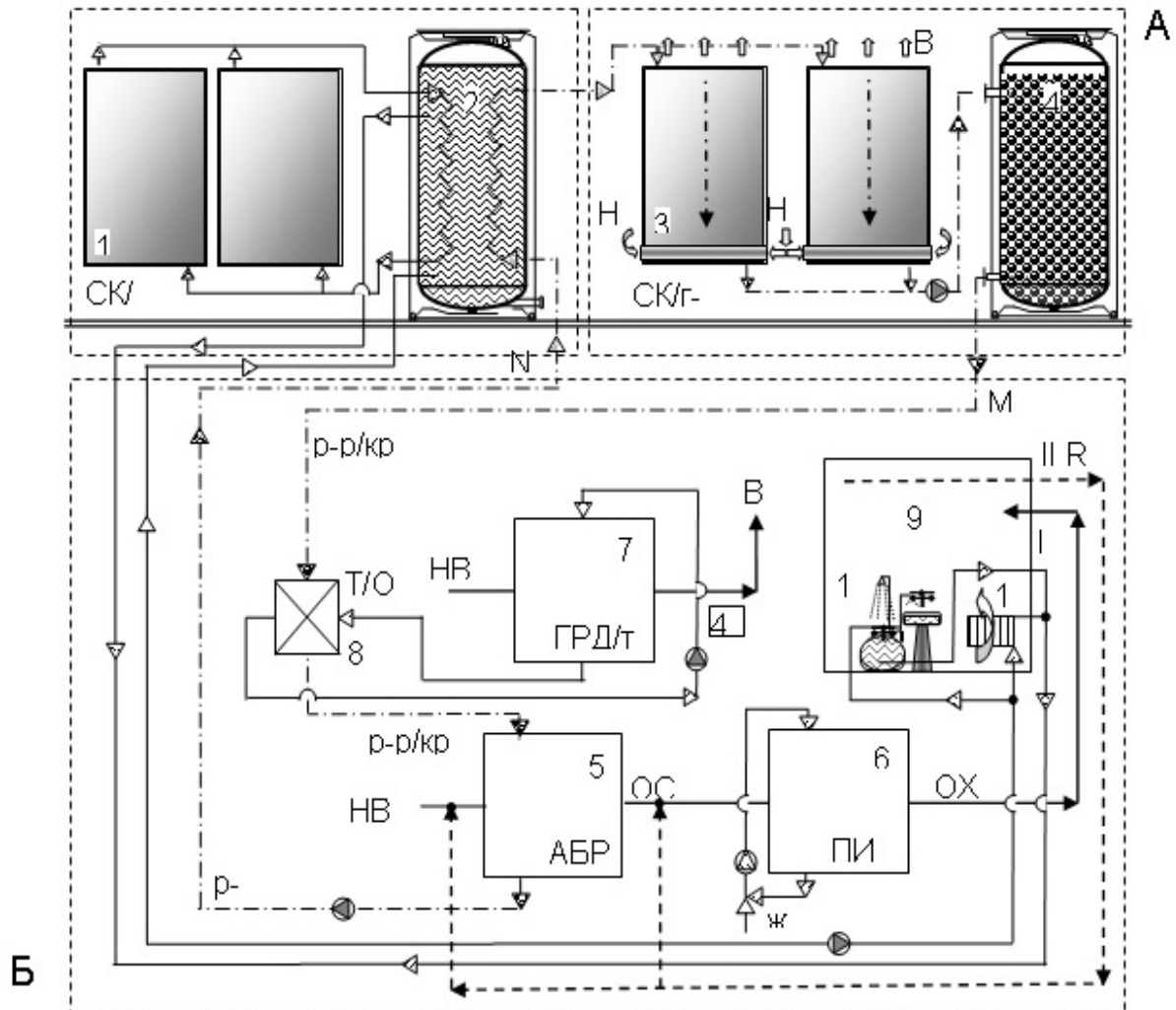
- вариант градирни, работающей на наружном воздухе НВ, $-t_1^2 28^{\circ}\text{C}$;
- вариант СХС, $t_{М}^1 19^{\circ}\text{C}$, $-t_1^2 21^{\circ}\text{C}$.

Параметры Б: $t_{ог}^1 35^{\circ}\text{C}$, $t_{М}^1 21^{\circ}\text{C}$, $t_{п}^1 13^{\circ}$, $x_{ог}^1 10$ г/кг:

- вариант градирни, работающей на наружном воздухе НВ, $-t_{ж}^2 24^{\circ}\text{C}$;
- вариант СХС, $t_{М}^1 16^{\circ}\text{C}$, $-t_{ж}^2 19^{\circ}\text{C}$;

Solar liquid-desiccant cooling and air conditioning systems (SLDS)
 on the basis liquid and liquid solar collectors SCw and SCg-liq

Солнечное теплоснабжение (ССГВ) и обеспечение регенерации



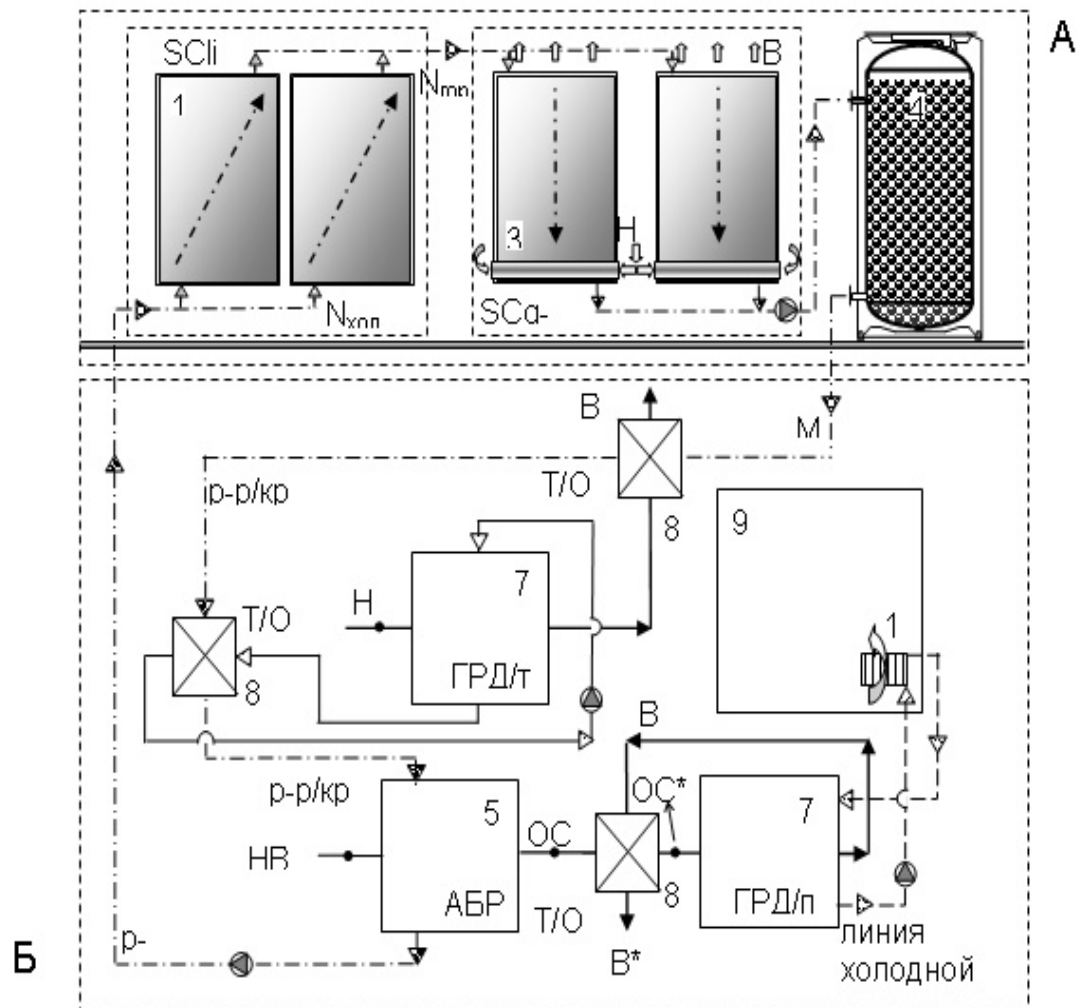
Осушительно-испарительная многофункциональная система (ССКВ,

Рис. 1. Принцип построения солнечной абсорбционной многофункциональной системы ССКВ (СХС).

Обозначения: 1 – система солнечного нагрева жидкости ССГВ на основе плоского солнечного коллектора-водонагревателя СК/ж; 2 – бак-теплоаккумулятор БА; 3 – солнечная система регенерации абсорбента ССРГ на основе коллектора-регенератора СК/г-ж; 4 – бак-накопитель крепкого раствора абсорбента; 5 – абсорбер-осушитель АБР; 6 – испарительный охладители воздуха прямого типа ПИО; 7 – испарительные охладители воды, градирня технологического назначения ГРДт; 8 – теплообменник; 9 – помещение; 10 и 11 – воздушнонагреватель (водо-воздушный теплообменник, fan-coil) и сантехнический узел; НВ – наружный воздух; ОС – осушенный воздух; В – выброс; R – контуры рециркуляции воздушных потоков; p-р/сл, p-р/кр – слабый и крепкий растворы абсорбента; ж – вода

Solar liquid-desiccant cooling and air conditioning systems (SLDS)
on the basis liquid and liquid solar collectors SCliq and SCg-liq

Солнечное обеспечение регенерации абсорбента (ССРГ)



Осушительно-испарительная многофункциональная система

Рис. 2. Принцип построения солнечной абсорбционной многофункциональной системы СХС на основе двухступенчатой схемы регенерации абсорбента в СКж и СКг-ж.

Обозначения по рис. 1, доп: 1 – система предварительного нагрева абсорбента на основе плоского солнечного коллектора-нагревателя СК/ж; 6 – испарительный водоохладитель прямого типа, градирня ГРД/пр; 8 – теплообменники; 10 – воздухоохладитель (водо-воздушный теплообменник, fan-coil).

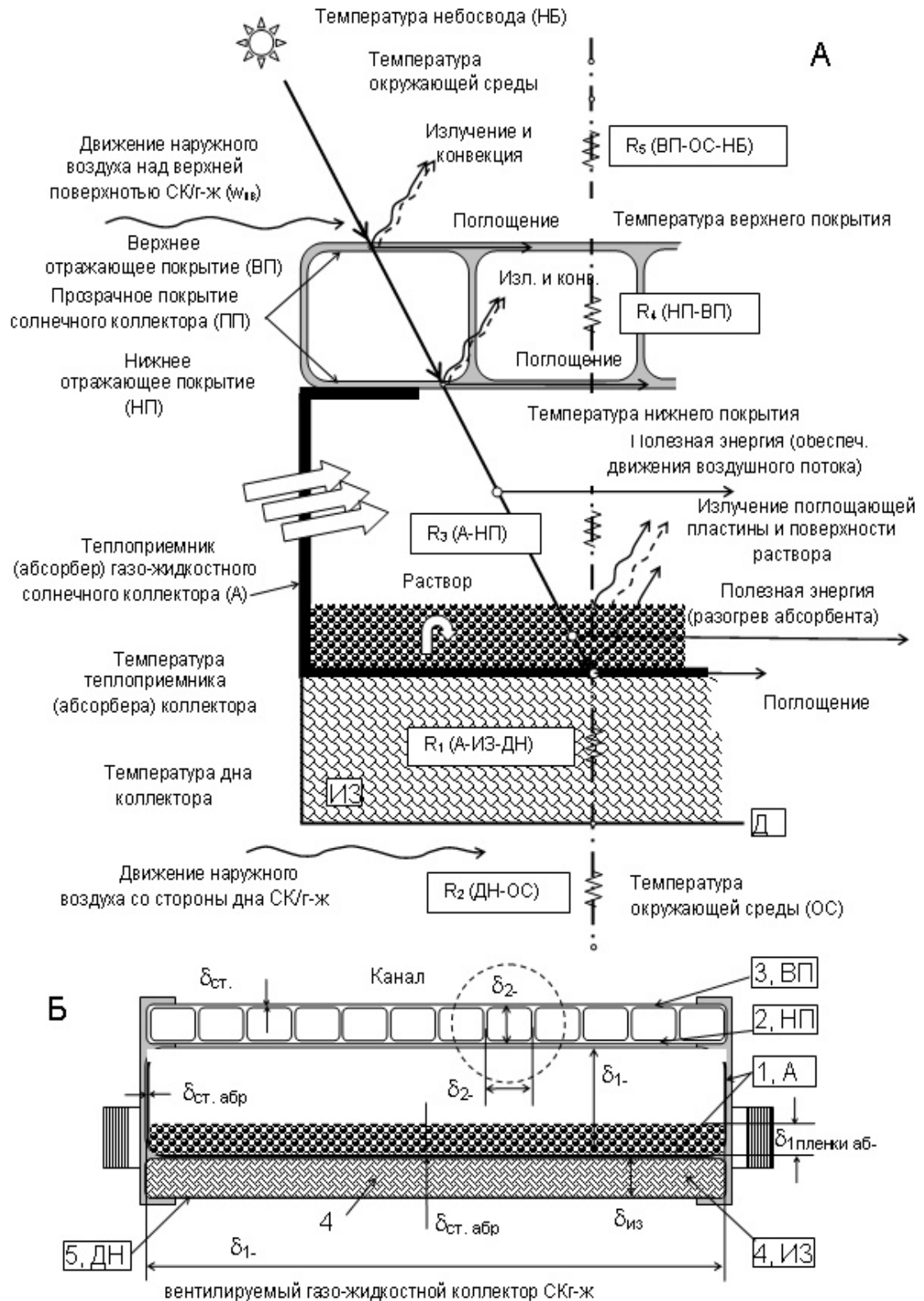
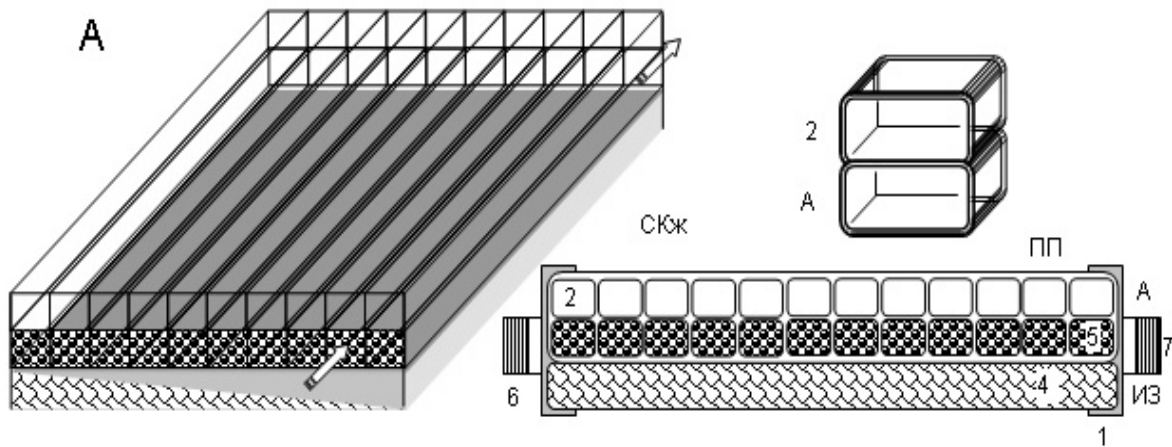


Рис. 3. К расчету тепловых потерь в газо-жидкостном солнечном коллекторе с гравитационным течением пленки абсорбента. Характерная тепловая цепь СКГ-ж
Обозначения: 1 (А) – теплоприемник (абсорбер); 2 – нижнее прозрачное покрытие (НП); 3 – верхнее прозрачное покрытие (ВП); 4 – теплоизоляция дна; ОС – окружающая среда; НБ – небосвод

Солнечный жидкостной коллектор СКж (SCw) в едином двухъярусном



Солнечный газо-жидкостной коллектор СКг-ж

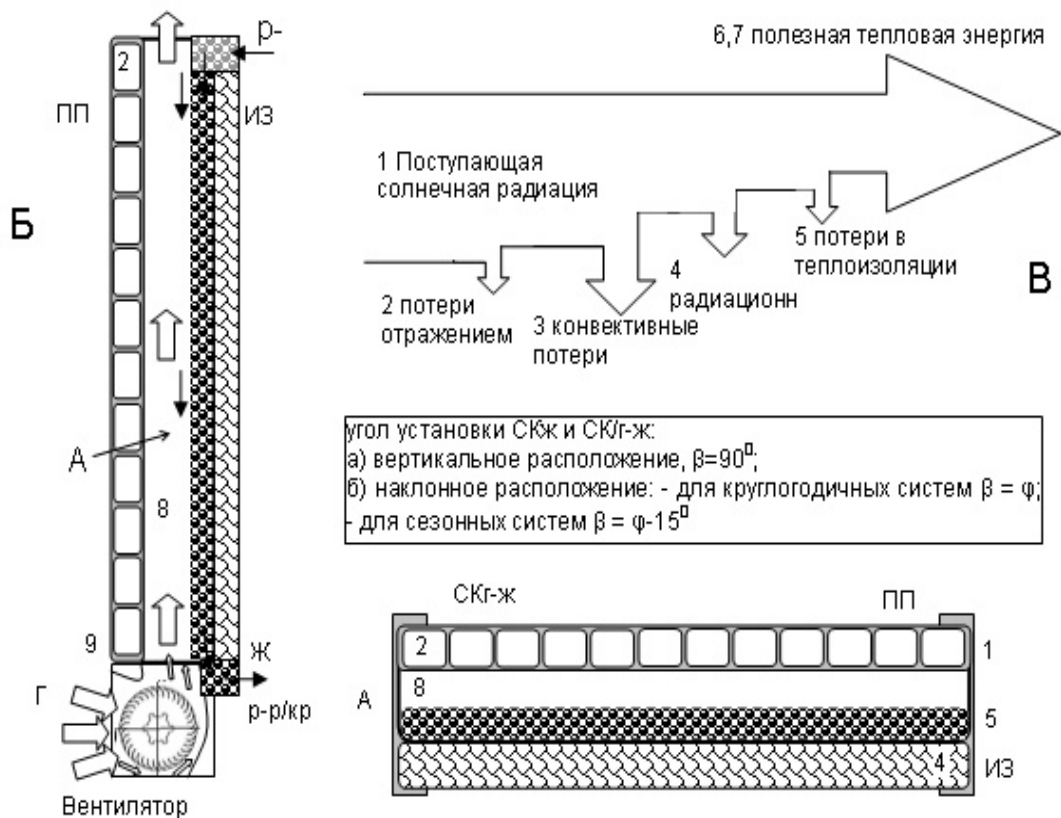


Рис. 4. Принцип построения жидкостного солнечного коллектора СК/ж на основе единого двухъярусного (трехстенного) моноблока из многоканальных поликарбонатных плит (А) и газо-жидкостного солнечного коллектора-регенератора СКг-ж (Б). Распределение тепловых потерь в плоском газо-жидкостном солнечном коллекторе-регенераторе (В).

Обозначения: 1 – корпус; 2 – прозрачное покрытие (ПП); 3 – теплоприемник (А); 4 – теплоизоляция, 5 – жидкий теплоноситель (раствор абсорбента); 6, 7 – гидравлический коллектор; 8 – рабочий канал СКг-ж; 9 – вентилятор

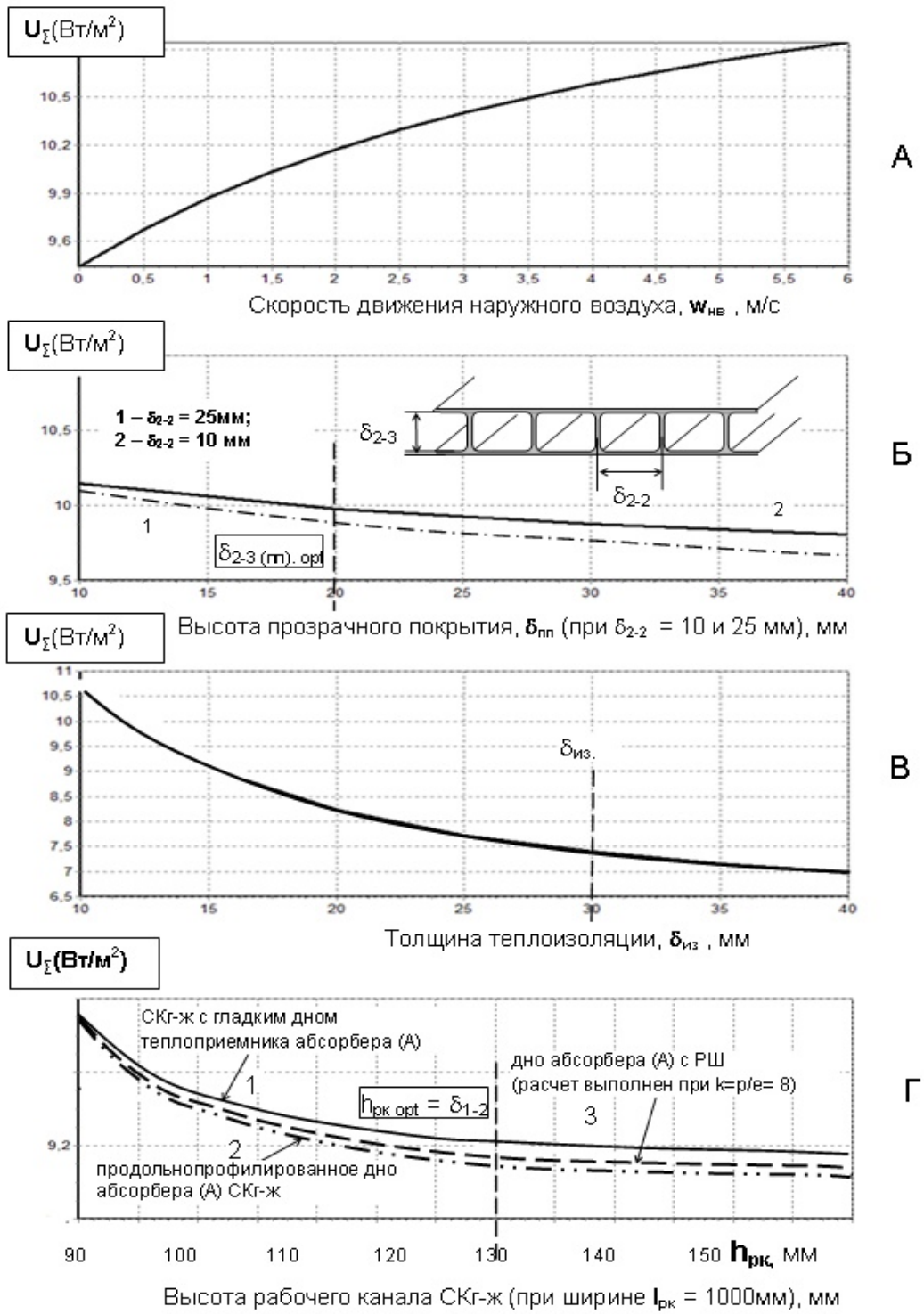


Рис. 5. Зависимость коэффициента суммарных тепловых потерь в СКГ-ж: А – от скорости наружного воздуха; Б – от толщины прозрачного покрытия СКГ-ж; В – от толщины изоляции СКГ-ж, Г – от высоты рабочего канала

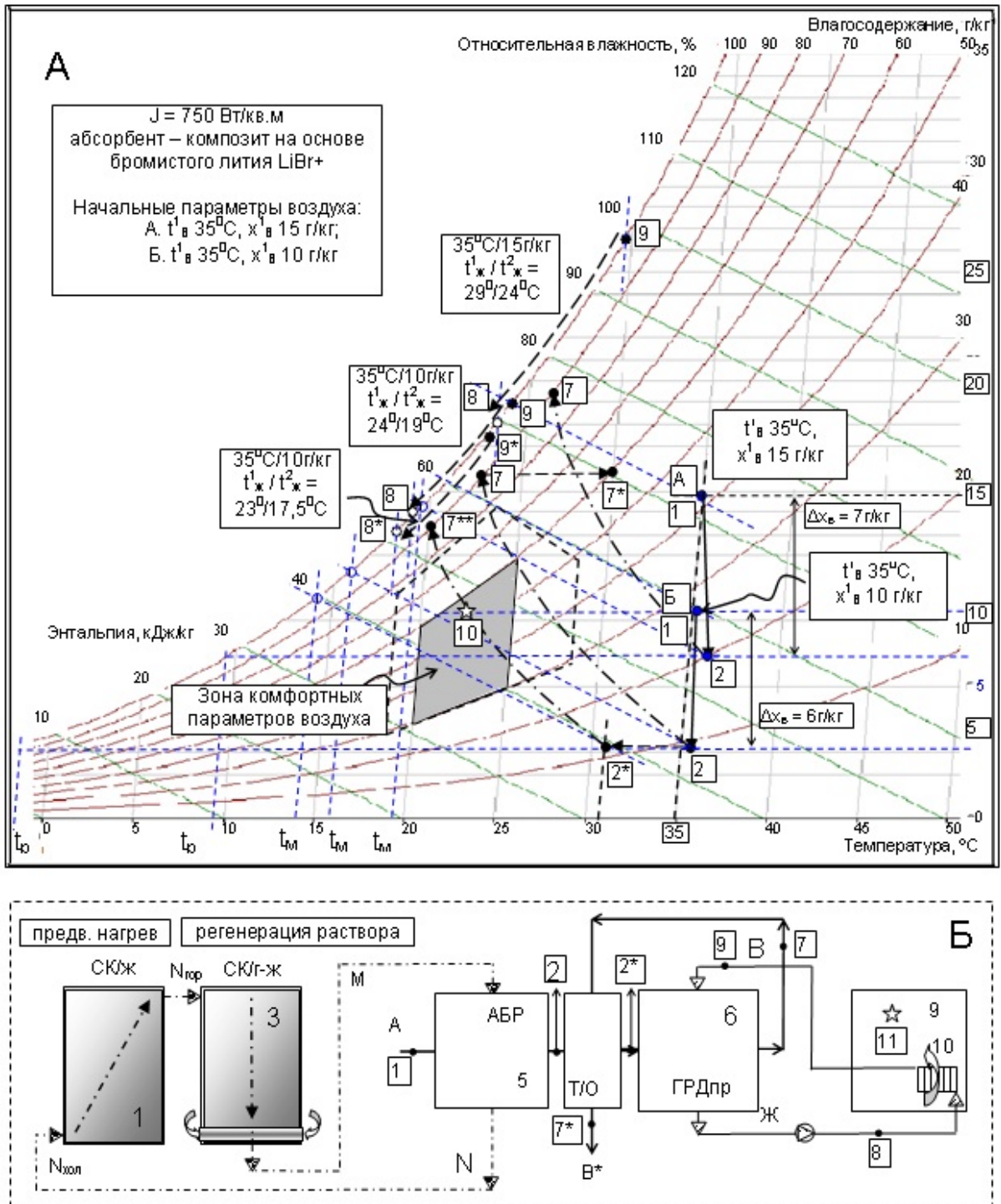


Рис. 6. Принципиальные возможности разработанных солнечных холодильных систем СХС (СКж – СКг-ж) на основе открытого абсорбционного цикла с прямой солнечной регенерацией раствора абсорбента (формула АБР-ГРД + теплообменник, по схеме на рис. 2).

Обозначения по рис. 1, доп.: 1-2 – процесс осушения воздуха в абсорбере; 2-7 – изменение состояния воздушного потока в градирне; 9-8 – процесс испарительного охлаждения воды в «продуктовой» градирне ГРДпр; 11 – состояние воздуха в помещении, при охлаждении поступающей в теплообменник (8) холодной воды из градирни при температуре (8*)

– вариант СХС с теплообменником на отбросном воздушном потоке из ГРДпр, – t_M^1 14°C, – t_1 17°C.

Таким образом, солнечная холодильная система СХС позволяет понизить предел испарительного охлаждения до температуры точки росы наружного воздуха. В сравнении с традиционными парокомпрессионными системами СХС альтернативная система обеспечивает значительное снижение энергозатрат (на 40-45%), что подтверждается немногочисленными данными эксплуатации аналогичных установок [1,9] в мире. Для обеспечения собственных нужд альтернативной системы в электроэнергии (насосы, вентиляторы) может использоваться солнечная энергия от фотоэнергетических станций. В этом случае решение полностью замкнуто на возобновляемые, экологически чистые источники энергии.

ВЫВОДЫ:

1. СХС позволяет снизить температуру охлажденной в градирне воды ниже температуры наружного воздуха по мокрому термометру, то есть, ниже традиционного предела испарительного охлаждения воды в градирне;

2. СХС с теплообменником на выбрасываемом из низкотемпературной ГРДпр воздушном потоке, обеспечивающем охлаждение осушенного воздуха после абсорбера перед градирней, позволяет дополнительно понизить температуру охлажденной воды;

3. Пределом испарительного охлаждения воды в СХС является температура точки росы наружного воздуха, что существенно расширяет принципиальные возможности методов испарительного охлаждения сред;

4. Переход на СХС с прямой регенерацией абсорбента (непосредственно в коллекторе-регенераторе СК/г-ж), сравнительно с ранее разработанными солнечными системами с непрямой регенерацией [1, 10] позволяет исключить традиционный десорбер из схемы и снизить тепловые потери в соответствующих коммуникациях, снизить массу и габариты солнечных систем в целом, и, как следствие, их стоимость;

5. Использование двухступенчатой схемы регенерации, предложенное авторами (по двум разработанным решениям на рис. 1 и 2), обеспечивает уменьшение зависимости характеристик СХС от колебаний солнечной активности и ветронагрузки в месте установки СХС и снижает необходимость в дополнительном

традиционном источнике тепла для регенерации абсорбента, то есть поддержания непрерывности цикла, повышая автономность солнечных многофункциональных систем;

6. Выполненный анализ суммарных конвективных и радиационных тепловых потерь в СК/г-ж позволил оптимизировать основные геометрические размеры рабочего канала и конфигурацию дна теплоприемника коллектора-регенератора, существенно увеличив реальную смоченность рабочей поверхности и, соответственно, обеспечивая снижение требуемой суммарной поверхности солнечных коллекторов СХС;

7. Альтернативная система СХС, основанная на испарительно-осушительном цикле с прямой регенерацией абсорбента, в состав которой входят солнечные газо-жидкостные коллекторы, приводит к меньшему истощению природных ресурсов (в том числе, энергоресурсов), чем СХС, использующая традиционный тип солнечных коллекторов и непрямую регенерацию в традиционном десорбере, что говорит о ее большей энергетической эффективности; она вносит меньший вклад в глобальное изменение климата.

Литература (References)

- [1] Doroshenko A.V., Glauberma M.A. [Alternative energy]. *Refrigerating and Heating Systems*, [Odessa I.I. Mechnicov National University Press], Odessa, 2012.
- [2] Doroshenko A., Silich S. [Development of multifunction alternative solar energy systems with coolers of liquid, air and air- liquid solar collector]. *Holodilnaya tehnika I tehnologiya*, Odessa, 2010, no. 6 (128), pp. 28-34. (In Russian)
- [3] Doroshenko A., Silich S. [Heat - cooling multifunction solar systems]. *Problemele energeticii regionale*, Moldova, Academia de Stiinte, Institutul de Energetica, 2010, no. 3(14), pp. 44-52. (In Russian)
- [4] Doroshenko A., Milovanov V., Silich S. [Multifunction solar systems are based on water and air solar coolers]. *Holodilnaya tehnika I tehnologiya*, Odessa, 2012, no. 1(135), pp. 49-57. (In Russian)
- [5] Doroshenko A., Milovanov V., Silich S. [Design of a collector-regenerator for solar liquid desiccant alternative cooling system]. *Holodilnaya tehnika I tehnologiya*, Odessa, 2013, no. 1(141), pp.17-23. (In Russian)
- [6] Chen G.M., Zheng J., Doroshenko A., Shestopalov K. [Design and modeling of a collector-regenerator for solar liquid desiccant cooling system]. "International Sorption Heat Pump Conference", Washington, 2014.

- [7] Doroshenko A., Shestopalov K., Khliyeva O. [Development of new schematic solutions and heat and mass transfer equipment for alternative solar liquid desiccant cooling systems]. "International Sorption Heat Pump Conference", Washington, 2014.
- [8] Chen G.M., Doroshenko A.V., Shestopalov K.O., Khliyeva O.Y. [Evaporative coolers of water and air for cooling systems]. *Analysis and perspectives*, Hangzhou, August 31-September 2, 2014 [11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, 2014].
- [9] Chen G.M., Doroshenko A.V., Koltun P., Shestopalov K.O. [Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors], *Solar Energy*, 2015, no. 115, pp. 577-588.
- [10] Chen G.M., Shestopalov K.O., Doroshenko A.V., Koltun P. [Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015, Submitted paper.

Сведения об авторах:



Дорошенко Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, тепломассообмен, холодильная техника, альтернативная энергетика.
E-mail: dor_av @ i.ua



Антонова Альфия Раисовна – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, тепломассообмен, математическое моделирование, холодильная техника, альтернативная энергетика.
E-mail: abantonova @ i.ua



Гарх Саяд (Ливия) – аспирант кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, холодильная техника, альтернативная энергетика.