

*Дорошенко А.В.<sup>1</sup>, Антонова А.Р.<sup>1</sup>, Глауберман М.А.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Одесская государственная академия холода, г. Одесса*

<sup>2</sup>*ННВЦ при ОНУ имени И.И. Мечникова, г. Одесса*

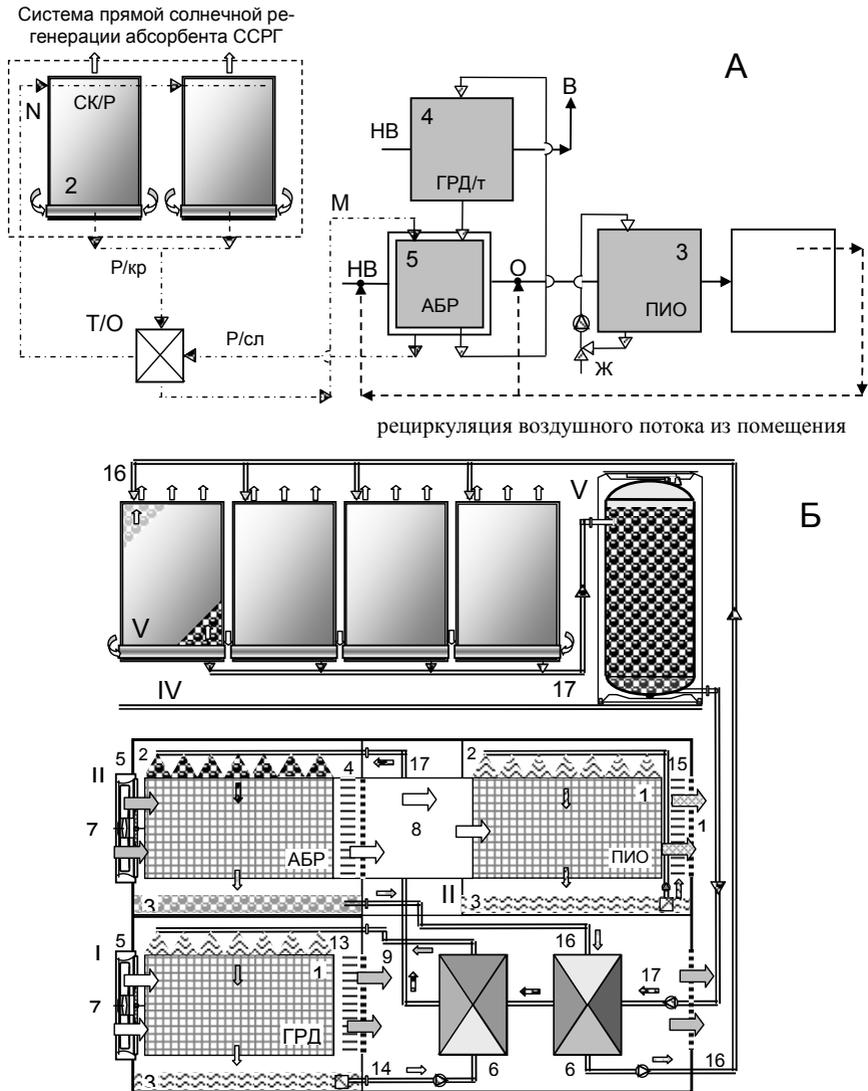
## **Альтернативные энергетические системы на основе газо-жидкостных солнечных коллекторов-регенераторов**

*Одним из перспективных направлений солнечной энергетики являются многофункциональные солнечные системы на основе открытого абсорбционного цикла. Сердцем таких систем является солнечный газо-жидкостной коллектор для прямой (непосредственной) регенерации абсорбента. Разработаны принципы построения таких солнечных систем и теплообменная аппаратура, входящая в их осушительный и охлаждающий контуры. Выполнен предварительный анализ принципиальных возможностей солнечных систем.*

**I. Разработанные схемные решения для солнечных систем с прямой регенерацией абсорбента.** Солнечные системы тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха, основанные на открытом абсорбционном цикле, разрабатываются как с непрямой [1, 2, 3], так и с прямой, непосредственной, регенерацией абсорбента [4]. Последние обеспечивают снижение габаритов системы в целом, поскольку в них отсутствует десорбер-регенератор абсорбента, функции которого выполняет солнечный коллектор-регенератор. Рассмотрим работу такой солнечной системы кондиционирования воздуха 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 коллекторов-регенераторов абсорбента СК/Р (7), емкость для «крепкого» раствора абсорбента и теплообменники 6 (внутренняя рекуперация тепла «слабого» холодного и «крепкого» горячего растворов абсорбента). Тепло, необходимое для регенерации абсорбента обеспечивается солнечной системой, а охлаждение абсорбера автономной вентиляторной градирней ГРН/т (3, градирня технологического назначения). 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, 2]. В схеме охлаждения абсорбера может использоваться вынесенный теплообменник (6), либо это специальный водоохлаждаемый абсорбер (показанный на рис. 2), в котором теплообменник расположен непосредственно в объеме насадки.

Охлаждающий блок ССКВ включает испарительный охладитель воздуха прямого типа ПИО (4). 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 ис



**Рис. 1.** Принцип построения осушительно-испарительных многофункциональных систем с использованием солнечной энергии для восстановления абсорбента (испарительный охладитель воды (градирня) в автономном использовании).

А: 1 – солнечная система регенерации абсорбента ССРГ; 2 – солнечный коллектор-регенератор СК/Р; 3 – испарительный охладитель воздуха прямого типа; 4 – испарительный охладитель воды; ГРД – градирня; 5 – абсорбер-осушитель АБР.

Б: 1 – насадка ТМА; 2 – распределитель жидкости; 3 – емкость для жидкости (танк); 4 – сепаратор капельной влаги; 5 – вентилятор; 6 – теплообменник; 7 – поступающий свежий воздух; 8 – осушенный воздух; 9 – отработанный в градирне воздух; 10 – охлажденный в ПИО воздух; 13 – горячая вода; 14 – охлажденная вода; 15 – рециркулирующая в ПИО вода; 16, 17 – слабый и крепкий растворы абсорбента; 18 – охлаждающая абсорбер вода из ГРД/т.

парительном 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, либо после него, является воздухом, покидающим кондиционируемое помещение (Р).

Особый интерес для альтернативных систем представляет схемы на рис.2, где в качестве испарительного охладителя дополнительно используется продуктовая градирня 4А. Воздух, осушенный в абсорбере 5 и имеющий низкую температуру точки росы, поступает в градирню ГРН/п (4А), где обеспечивается глубокое охлаждение воды, которая может использоваться в вентилируемых теплообменниках-охладителях (7), устанавливаемых непосредственно в кондиционируемых помещениях (6), либо холодильных камерах. Охладительный блок в этом случае может располагаться вне кондиционируемых помещений и здания. На рис. 2А и Б приведены варианты разработанных схем, обеспечивающие возможность использования холодного воздушного потока, покидающего градирню, работающую на предварительно осушенном и охлажденном в абсорбере воздушном потоке. Вполне понятно, что такие решения приводят и возрастанию энергозатрат на движение воздушных потоков в контурах СХС.

На рис. 2.В показан вариант СХС с использованием холодной воды для охлаждения слабого раствора перед абсорбером. Все подобные решения требуют особого технико-экономического анализа.

На рис. 1Б приведена принцип компоновки блока охлаждения ССКВ.

**II. Разработка СК/Р.** Солнечный коллектор-регенератор СК/Р является важнейшей частью системы регенерации (восстановления абсорбента) и представляет собой обычный солнечный коллектор-воздухонагреватель (рис. 3), в котором движение воздушного потока обеспечивается солнечным разогревом (разностью плотностей воздуха на входе и выходе из СК). Такой воздушный СК включает теплоприемник (абсорбер), прозрачное покрытие (ПП) с воздушным зазором между ПП и теплоприемником (каналом, по которому движется воздушный поток), и теплоизоляцию дна [1,4].

В работе [5] выполнен анализ шести моделей воздушных СК с различным взаимным расположением теплоприемника, прозрачного покрытия ПП и воздушного канала. Теплоприемник располагался на «дне» воздушного канала (три модели) и над воздушным каналом, непосредственно под ПП и воздушным зазором (три модели), а также имел различную конфигурацию поверхности теплоприемника (абсорбера). Поверхность теплоприемника, выполненная из алюминиевого листа с черновым покрытием, была плоской и поперечнорифленной, чтобы способствовать лучшему перемешиванию воздуха и повысить величину теплосъема от теплоприемника. Было показано, что: максимальным к.п.д. обладает модель с нижним расположением теплоприемника, в виде «дна» воздушного канала; для этой модели температура теплоприемника была ниже ( $58^{\circ}\text{C}$ ), а температура воздушного потока на выходе из коллектора выше ( $41^{\circ}\text{C}$ ), чем у остальных моделей; несколько худшие результаты получены для поперечнорифленной поверхности теплоприемника; идея расположения теплопри-



емника над воздушным каналом для воздушного коллектора себя не оправдала. На основании этого, в качестве исходных принципиальных решений для разработки газо-жидкостного солнечного коллектора-регенератора мы приняли (рис. 3):

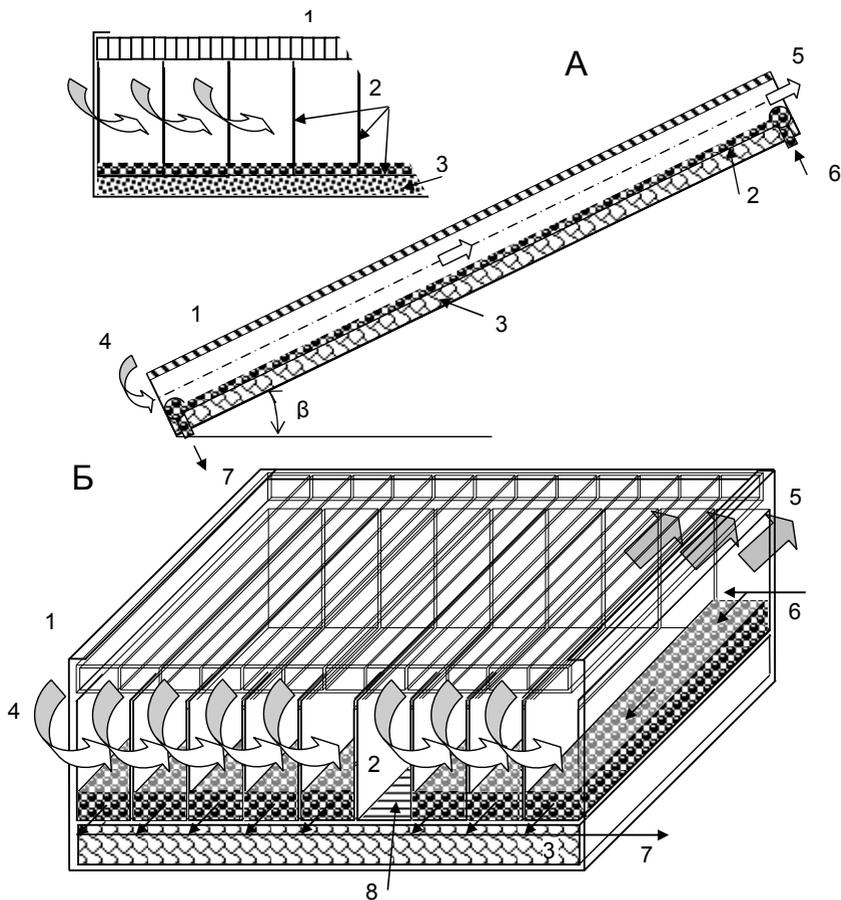
- модель СК/Р с нижним расположением теплоприемника, в виде «дна» воздушного канала;
- теплоприемник СК/Р выполняется из набора U-образных сегментов, из алюминиевого листа с черновым покрытием поверхности, чтобы способствовать лучшему распределению стекающей жидкостной пленки по наклонной поверхности солнечного регенератора.

Теплоприемник (абсорбер) солнечного коллектора-регенератора абсорбента СК/Р (рис.3) 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/Р<sub>г-ж</sub>. 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).

В качестве прозрачного покрытия (ПП) используется многоканальная поликарбонатная плита (1), хорошо зарекомендовавшая себя при создании полимерного водяного коллектора СК-П [6]. Потери тепла, обусловленные конвективной и радиационной составляющими, минимизируются воздушным зазором, поскольку каналы ПП заполнены воздухом и представляют собой воздушный зазор обычного плоского солнечного коллектора. Эти каналы дополнительно могут быть вакуумированы, что существенно улучшит характеристики СК/Р.

Поверхность «дна» теплоприемника (U-образного элемента) может быть плоской, а также продольно- или поперечноффрированной. Несомненный интерес представляет использование регулярной шероховатости поверхности, по которой стекает пленка абсорбента, что обеспечит улучшение распределения жидкостной пленки по поверхности, определенный режим волнообразования на поверхности пленки и интенсифицирует процессы тепломассообмена между абсорбентом и воздушным потоком [7]. Волнообразная поверхность пленки жидкости в свою очередь представляет для газового потока своего рода регулярную шероховатость, что обеспечивает интенсификацию обменных процессов в обоих фазах одновременно.

Солнечный коллектор-регенератор, как и обычный водяной или воздушный коллектор, ориентирован на юг и имеет определенный угол наклона к горизонтальной поверхности для максимального приема солнечной энергии с учетом характера системы (сезонная или круглогодичная). При южной ориентации солнечных коллекторов угол наклона составляет  $\beta = \varphi$  для круглогодичных гелиосистем и  $\beta = \varphi - 15^\circ$  для сезонных гелиосистем (период эксплуатации апрель – октябрь). Уточнение угла наклона  $\beta$  выполнено в работе [1, 7].



**Рис. 3.** Принципиальная компоновочная схема солнечного газо-жидкостного коллектора с гравитационным течением жидкостной пленки в варианте солнечного коллектора-регенератора абсорбента СК/Р.

1 – прозрачное покрытие; 2 – элементы (секции) теплоприемника (абсорбера); 3 – теплоизоляция; 4, 5 – воздушный поток; 6, 7 – абсорбент; 8 – поперечноффрированная поверхность, по которой стекает жидкостная пленка.

Конструкция СК/Р в варианте естественной циркуляции воздуха приведена на рис.3. Теплоприемник СК/Р представляет собой набор элементов U-образной формы, изготовленных из алюминиевого листа с черновым покрытием наружной поверхности и обеспечивает одновременный прогрев как самого воздушного потока, так и абсорбента, стекающего в виде тонкой пленки по «дну» коллектора под воздействием сил гравитации. Многоячейное членение теплоприемника обеспечивает равномерность прогрева воздушного потока и организует его движение в канале СК/Р. Это важно в виду малой движущей силы движения и возможности возникновения значительной неравномерности распределения воздушного потока по каналу СК/Р.

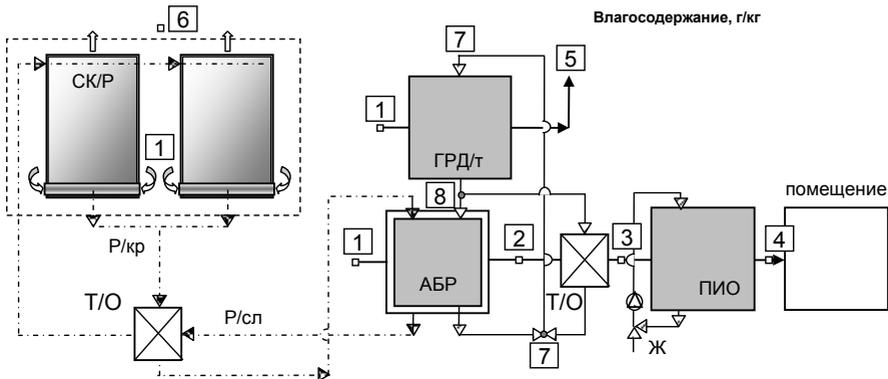
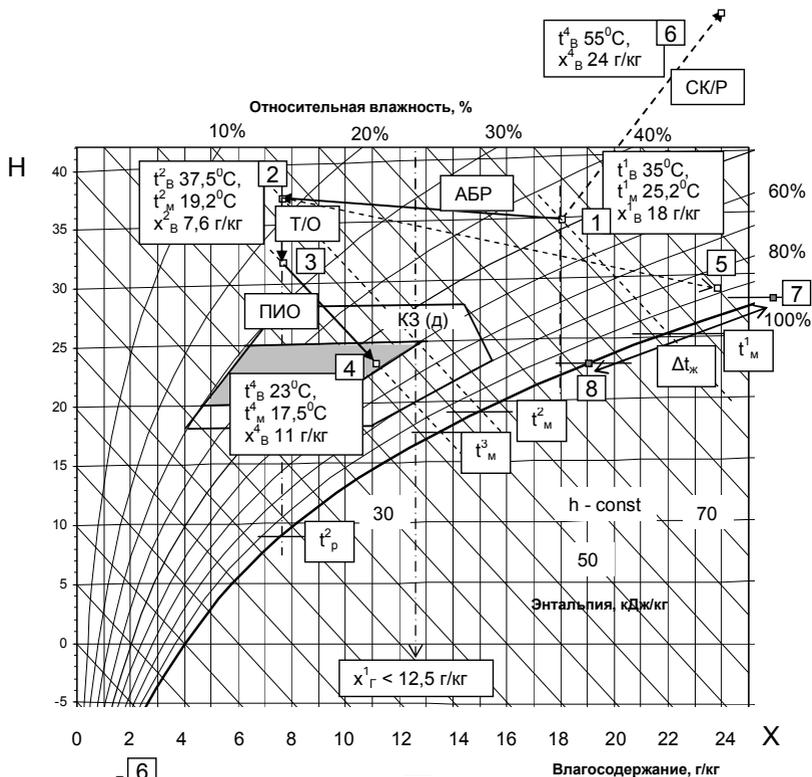
**III. Анализ возможностей.** На рис. 4 на H-X диаграмме влажного воздуха приведен общий анализ принципиальных возможностей разработанной ССКВ для случаев, когда  $x_g^1 > 13$  г/кг (для континентального климата характерна именно эта ситуация). В расчетах использовался абсорбент LiBr. Протекание процессов в ССКВ показано на примере характерной точки с расчетными параметрами:  $t_g = 35$  С,  $x_g = 18$  г/кг. На диаграмме показаны процессы осушения воздуха в абсорбере и последующего испарительного охлаждения воздуха в испарительном охладителе непрямого типа ПИО. Показаны процессы: 1-2 – процесс осушения наружного воздуха в абсорбере; 2-3 – процесс в теплообменнике вода-воздух; 3-4 – процесс в испарительном охладителе прямого типа ПИО; 2-5 – процесс изменения состояния воздуха в технологической градирне; 1-6 – процесс десорбции (изменения состояния воздушного потока в СК/Р); 7-8 – процесс охлаждения воды в градирне.

Рабочая концентрация раствора LiBr+ изменяется в пределах 51-60%.

Альтернативная солнечная система кондиционирования воздуха способна обеспечить получение комфортных параметров воздуха для любых климатических условий земного шара. В сравнении с традиционными парокомпрессионными системами кондиционирования воздуха альтернативная система ССКВ обеспечивает значительное снижение энергозатрат (на 30-45%), что подтверждается немногочисленными данными эксплуатации аналогичных установок в мире.

## **ВЫВОДЫ:**

1. Испарительное охлаждение газов и жидкостей эффективно при влагосодержании наружного воздуха  $x_r < 12 - 12.5$  г/кг, то есть в условиях сухого и жаркого климата; в случае, когда  $x_r > 12.5$  г/кг необходимо использовать осушительно-испарительный принцип организации работы охладителя; показано, что для создания солнечных холодильных и кондиционирующих систем ССКВ и СХС перспективно использование абсорбционного цикла открытого типа с прямой (непосредственной) регенерацией абсорбента, заключающегося в предварительном осушении воздуха и последующем его использовании для испарительного охлаждения воды или термовлажностной обработки воздушных потоков;



**Рис. 4.** Изображение рабочих процессов в СХС по схеме на рис. 1А с теплообменником после абсорбера.

**Показаны процессы:** 1-2 – процесс осушения наружного воздуха в абсорбере; 2-3 – процесс в теплообменнике вода-воздух; 3-4 – процесс в испарительном охладителе прямого типа ПАО; 2-5 – процесс изменения состояния воздуха в технологической градирне; 1-6 – процесс десорбции (изменения состояния воздушного потока в СКР/Р); 7-8 – процесс охлаждения воды в градирне.

2. Разработаны схемные решения для альтернативных (солнечных) систем, в частности, ССКВ, в которых реализуется процесс термовлажностной обработки воздуха в испарительном охладителе прямого типа ПИО; разработаны схемные решения для получения охлажденной воды, подаваемой в кондиционируемое помещение, в систему водо-воздушных теплообменников;
3. Для систем с открытой регенерацией абсорбента разработан газожидкостный солнечный коллектор-регенератор с гравитационным течением жидкостной пленки, с естественной циркуляцией воздушного потока;
4. Выполнен предварительный анализ возможностей разработанных решений на примере задачи кондиционирования воздуха, показавший возможность обеспечения комфортных параметров воздуха для любых климатических условий земного шара; в сравнении с традиционными парокомпрессионными системами кондиционирования воздуха альтернативная система ССКВ обеспечивает значительное снижение энергозатрат (на 30–45%).

#### Литература:

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Глауберман М.А. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика) – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 374 с.
2. Lowenstein H., 1993, Liquid desiccant air-conditioners: An attractive alternative to vapor-compression systems. Oak-Ridge nat. Lab/Proc. Non-fluorocarbon Refrig. Air-Cond. Technol. Workshop. Breckenridge, CO, US, 06.23-25, P. 133-150.
3. Grossman G. Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. Faculty of Mechanical Engineering, Technion – Israel Institute of Technology. – 2001.
4. Gandhidasan P. Performance analysis of an open liquid desiccant cooling system using solar energy for regeneration. Int. J. Refrig., Vol. 17, № 7, 1994. – P. 475-480.
5. Turhan Koyuncu Performance of various design of solar air heating for crop drying applications // Renewable Energy. – V. 31. – 2006. – P. 1073-1088.
6. Дорошенко А.В., Глауберман М.А., Роговская Э.Т. Солнечные плоские коллекторы из полимерных материалов // Физика аэродисперсных систем. – Т.42. –2005. – С.32-45.
7. Дорошенко А., Горин А. Альтернативные системы кондиционирования воздуха (солнечные холодильные и кондиционирующие системы на основе открытого абсорбционного цикла) // АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика). – 2005. – №1. – С. 60–64.

*Дорошенко О.В., Антонова А.Р., Глауберман М.А.*

**Альтернативні енергетичні системи на основі газорідинних сонячних колекторів - регенераторів**

**Анотація**

*Одним з перспективних напрямків розвитку сонячної енергетики являються багатofункціональні сонячні системи на основі відкритого абсорбційного циклу. Серцем таких систем є сонячний газорідинний колектор з гравітаційною течією рідинної плівки для прямої (безпосередньої) регенерації абсорбенту. Розроблені принципи побудови таких сонячних систем та тепломасообмінна апаратура, яка являється частиною їх осушувального та охолоджувального контурів. Виконаний попередній аналіз принципових можливостей сонячних систем.*

*Doroshenko A.V., Antonova A.R., Glauberman M.A.*

**Alternative power systems on the basis of gas-liquid solar collectors**

**Summary**

*One of perspective directions of solar power is the multifunctional solar systems on the basis of open absorption cycle. Heart of such systems is the solar gas-liquid collector for a direct regeneration absorbent. The principles of construction of such solar systems and heat-mass-transfer equipment which is included contours of drainage of air and evaporative cooling of gas or liquid are developed. The preliminary analysis of basic opportunities of solar systems is fulfilled.*