

ТЕПЛОМАСООБМІН

УДК 536.248.2:532.529.5

*Глауберман М.А.¹, Дорошенко А.В.¹, Кириллов В.Х.¹,
Антонова А.Р.², Людницкий К.В.²*

¹ ННВЦ при ОНУ имени И.И. Мечникова,

² Одесская национальная академия пищевых технологий

Солнечные абсорбционные холодильные системы. Принципы построения и анализ возможностей

Разработаны схемные решения для альтернативных холодильных систем, основанных на использовании теплоиспользующего абсорбционного цикла и солнечной энергии для регенерации раствора абсорбента. Использован двухступенчатый принцип построения осушительного и охладительного контуров с возрастанием концентрации абсорбента по ступеням каскада. Тепло-массообменная аппаратура пленочного типа, входящая в состав осушительного и охладительного контуров, унифицирована и выполнена на основе моноблоковых многоканальных композиций из полимерных материалов. Выполнен, на основании экспериментальных данных по эффективности процессов теплообмена в аппаратах осушительного и охладительного контуров солнечных систем, сравнительный анализ возможностей разработанных холодильных систем.

Введение. Солнечные многофункциональные холодильные системы, основанные на теплоиспользующем абсорбционном цикле могут обеспечивать комплексное решение задач осушения воздуха, тепло-хладоснабжения и кондиционирования [1-2]. В этих системах предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения сред в солнечных холодильных системах СХС [1, 5-7]. Разработанные решения для многоступенчатых охладителей охватывают нужды энергетики, химической и пищевой технологий и позволяют решать задачи охлаждения, не прибегая к традиционной парокомпрессионной технике. Это позволяет также существенно улучшить их эко-энергетические показатели [8].

I. Солнечные многофункциональные системы. Основные принципы построения. Авторами ранее [1, 5-10] рассматривалось построение солнечных систем кондиционирования воздуха ССКВ на основе блока [(ДБР↔АБР) – НИО], где предварительное осушение наружного воздуха в абсорбере обеспечивало последующее глубокое охлаждение основного воздушного потока «О» в каналах испарительного воздухоохладителя непрямого типа НИО, и солнечных холодильных систем СХС на основе блока [(ДБР↔АБР) – ГРД], где обеспечивается глубокое испарительное охлаждение воды. Здесь и далее использовались сокращения, приведенные в таблице.

Таблица. Используемые сокращения

ОГАХ	Одесская государственная академия холода
ТМА	тепломассообменный аппарат (Heat-Mass-Transfer Apparatus)
СХС	солнечная холодильная система (Solar liquid-desiccant cooling systems)
ССКВ	солнечная система кондиционирования воздуха (Solar liquid-desiccant air conditioning systems)
АБР (ABR)	абсорбер (Absorber)
ДБР (DBR)	десорбер (Desorber-regenerator)
ГРД (GRD)	градирня (Cooling Tower)
ИО	испарительный воздухоохладитель
НИОг (IECg)	испарительный воздухоохладитель непрямого типа (Indirect Evaporative Cooler, IECg)
НИОж (IECw)	испарительный водоохладитель непрямого типа (Indirect Evaporative Cooler, IECw)
В и О	основной и вспомогательный воздушные потоки (Primary air mass flow, Go; Secondary (Humidified) air mass flow, Gв)
М, N	крепкий и слабый раствор абсорбента
СКЖ (SCw)	солнечный жидкостный коллектор (Flat Plate Solar Collectors)
Т/О	теплообменник
ж (l)	жидкость (вода, раствор абсорбента) (water, liquid)
г (g)	газ-воздух (gas, air)
пл (fl)	жидкостная пленка (liquid film)
$t, t_m, t_{ж}, h$	температура воздуха по сухому и мокрому термометрам, (dry- and wet-bulb air temperature), температура воды (water film temperature), энтальпия (enthalpy)
$d_{\text{Э}} (d_e)$	эквивалентный диаметр канала насадки
$x, \text{г/кг}$	влажностное содержание (air humidity)
ОС	осушенный воздух (dried airstream)
НВ	наружный воздух (outdoor airstream)
ВВ	выбрасываемый в среду воздух (exhaust airstream)

На рис. 1 и 2 показана компоновка двух основных блоков солнечных абсорбционных систем. Из таких автономных блоков строится многофункциональная солнечная система в двух- или трехступенчатых вариантах.

Подписи к рисункам в статье: 1, 3 – абсорбер-осушитель наружного воздуха, АБР; 2 – испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИО; 5, 6 – десорбер-регенератор; 7 – градирня технологического назначения ГРДт; 8 – солнечная система, обеспечивающая процесс регенерации абсорбента на основе жидкостных солнечных коллекторов (СКж); 9 – теплообменник; 10 – дополнительный греющий источник; 11 – «продуктовая» основная градирня ГРДпр.)

Принципы построения многоступенчатых солнечных систем показаны на рис. 3. Градирня технологического назначения ГРДт обслуживает абсорбер АБР. Поддержание непрерывности осушительно-испарительного цикла обеспечивается в абсорбционных системах солнечной регенерацией абсорбента в десорбере-регенераторе (ДБР). Требуемый температурный уровень десорбции

Осушительно-испарительный контур солнечной холодильной системы
Solar liquid-desiccant systems (SLDS), – ABR-CTW

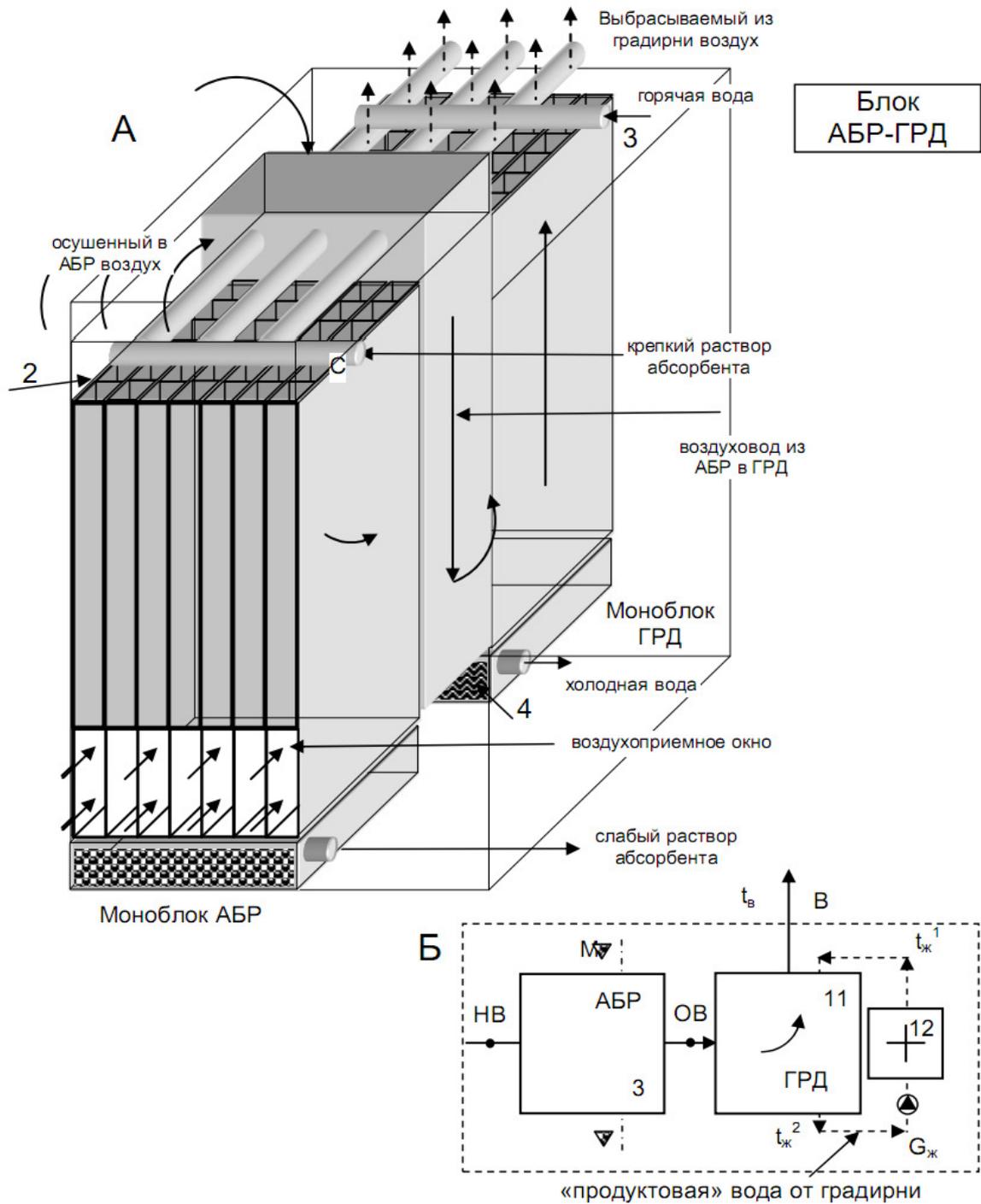


Рис. 1. Принципиальная компоновка элемента солнечной холодильной системы СХС на основе открытого абсорбционного цикла (моноблочный испарительный водоохладитель, построенный по формуле АБР-ГРД)

Обозначения приведены в тексте (к рис. 1Б), доп.: 1 – корпус аппарата; 2 – каналы насадки; 3 – распределитель жидкости (воды в ГРД и абсорбента в АБР); 4 – жидкостная емкость; 5 – насос; НВ, ВВ – наружный и выбрасываемый воздушные потоки, ОВ – осушенный в АБР воздух

Осушительно-испарительный контур солнечной системы кондиционирования воздуха
Solar liquid-desiccant systems (SLDS), – ABR-IEC

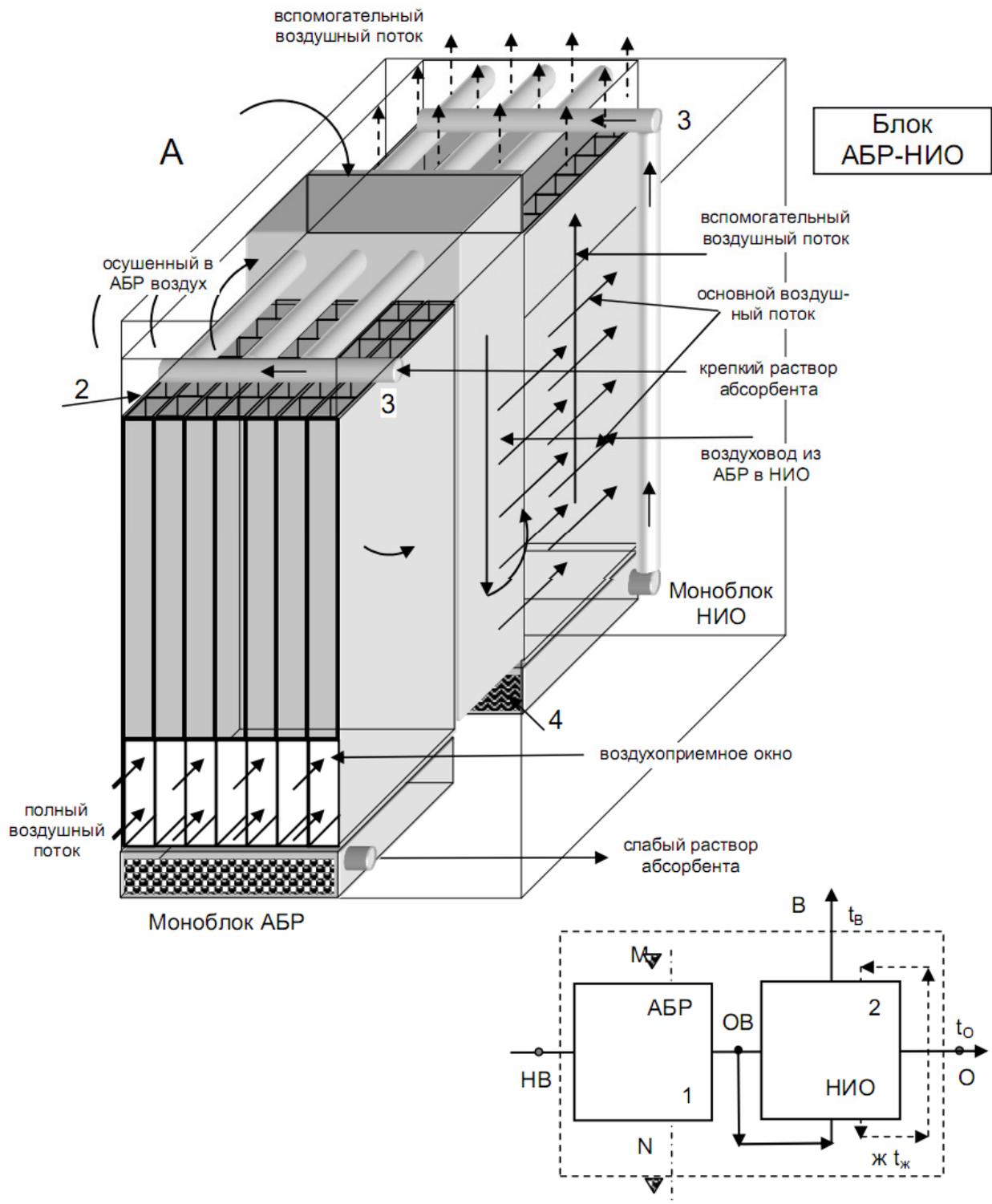


Рис. 2. Принципиальная компоновка ССКВ на основе открытого абсорбционного цикла (моноблочный испарительный воздухоохладитель, построенный по формуле АБР-НИО) Обозначения приведены в тексте (к рис. 2Б) и по рис. 1

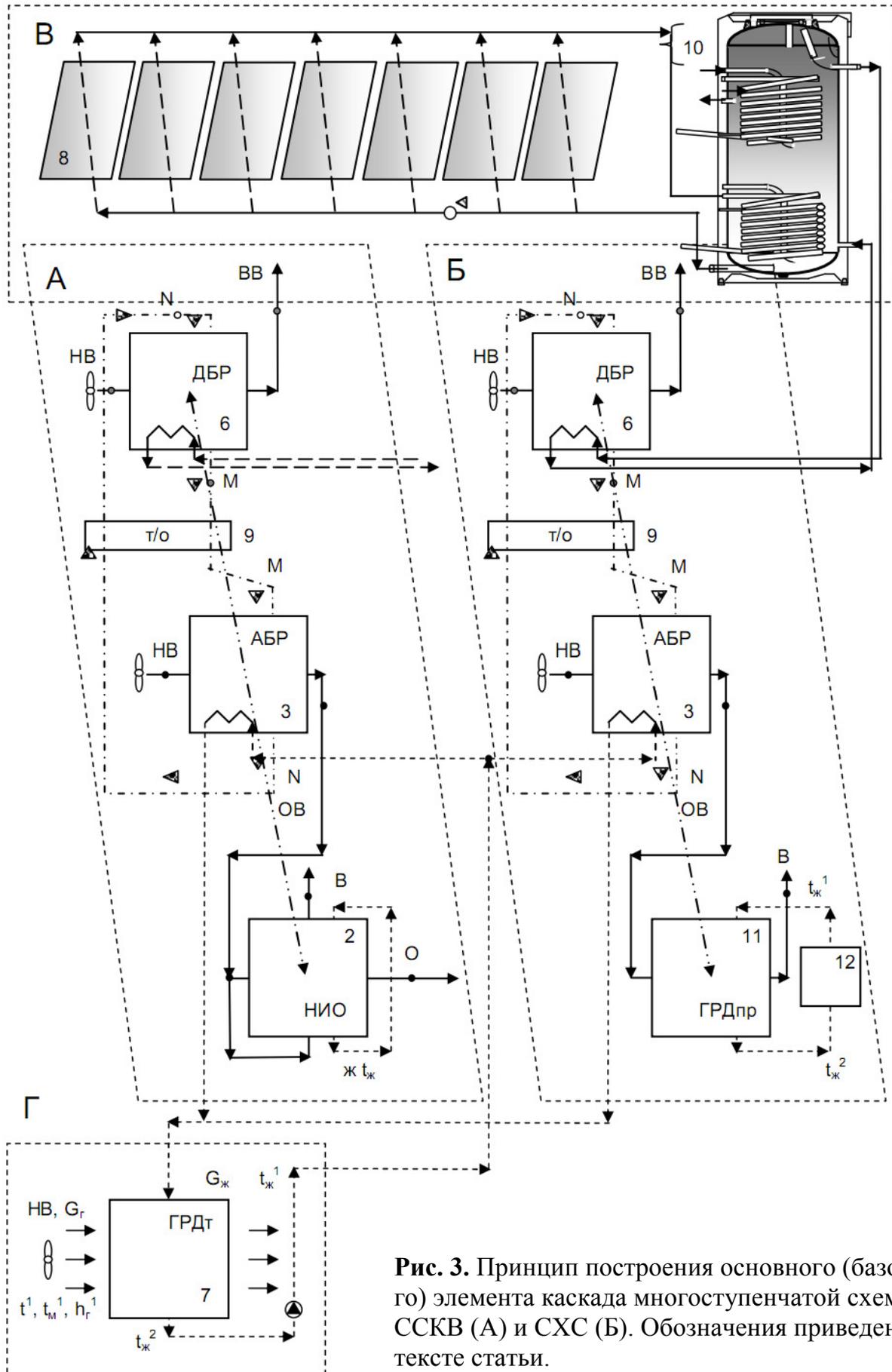


Рис. 3. Принцип построения основного (базового) элемента каскада многоступенчатой схемы ССКВ (А) и СХС (Б). Обозначения приведены в тексте статьи.

обеспечивается солнечной системой на основе жидкостных плоских солнечных коллекторов СКЖ (8) и баком-теплоаккумулятором БТА с дополнительным греющим источником 12 (электро- или газовый бойлер, а также любой наличный источник тепловых выбросов). Оптимальным для устойчивой работы альтернативных систем является рациональное, с учетом величины солнечной активности, ветронагрузки и др. аспектов, сочетание альтернативного и традиционного источников энергии. В солнечной системе используются разработанные плоские жидкостные солнечные коллекторы на основе полимерных многоканальных структур (теплоприемник и прозрачное покрытие СКЖ) [1].

В настоящей статье представлены разработанные, на основе указанных основных блоков, солнечные холодильные системы СХС (рис. 4А и 6А). СХС выполнена в двухступенчатом варианте, и состоит из автономных осушительно-охладительных блоков, первый блок решен по формуле [(ДБР↔АБР)–НИО] (в составе элементов 1 и 3), а во втором [(ДБР↔АБР)–ГРД] (элементы 3 и 11), причем каждая ступень регенерации (ДБР, элементы 5 и 6) замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР, элементы 1 и 3), соответственно [7, 9-10]. Основная концепция создания таких систем основана на следующих положениях:

1. Десорбер-регенератор (рис. 6А, элементы 5 и 6) выполнен многоступенчатым на основе идентичных моноблоков, каждый из которых представляет автономную ступень восстановления концентрации абсорбента, при этом требуемый температурный уровень регенерации абсорбента обеспечивается горячей водой от солнечной системы; раствор абсорбента последовательно проходит каждую ступень регенерации, в которую поступает «свежий» наружный воздух;
2. Двухступенчатая СХС может быть построена на основе одного, единого для двух степеней абсорбции, десорбера (рис. 4 и 5);
3. Схема осушительной части может быть построена так, чтобы каждая ступень регенерации (ДБР) была замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР), что приводит к росту концентрации абсорбента от ступени к ступени (в диапазоне возможных концентраций используемого раствора бромистого лития LiBr, что ограничено опасностью начала кристаллизации раствора при высоких концентрациях абсорбента);
4. Внутренняя рекуперация тепла обеспечивается системой теплообменников: на линиях горячий-крепкий (М) и холодный-слабый (N) растворы бромистого лития LiBr;
5. В охлаждающей части схемы последовательно используется в первой ступени охлаждения воздухоохладитель непрямого типа НИО (2), включенный в схему после соответствующей ступени абсорбции; во второй ступени СХС – градирня ГРД (11).

Все теплообменники аппараты (ТМА) солнечных систем конструктивно унифицированы, основаны на использовании аппаратов пленочного типа, и основаны на поперечноточной схеме контактирования потоков газа и жидко-

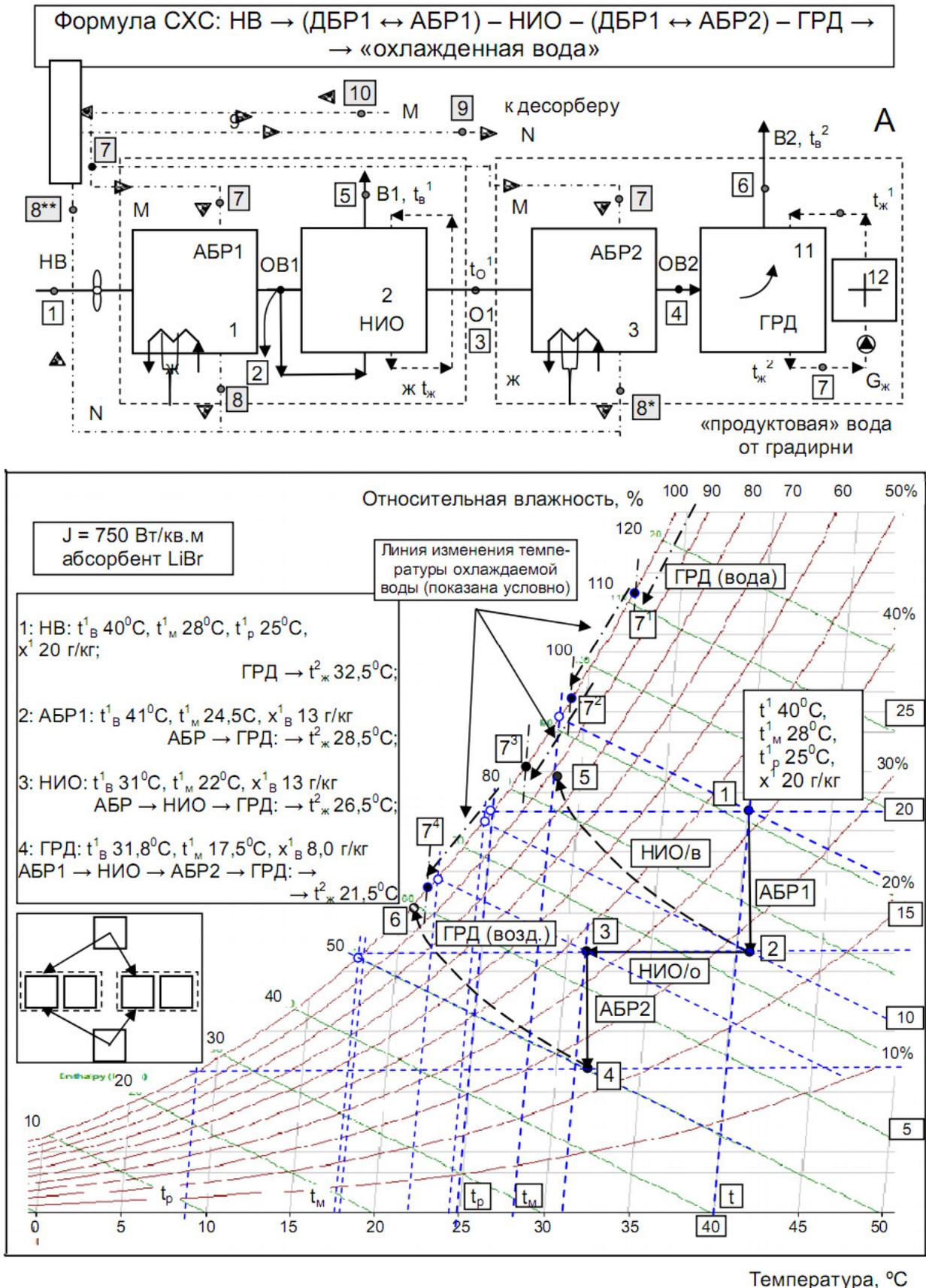


Рис. 4. Принципиальные возможности разработанных СХС (формула АБР1-НИО1-АБР2-ГРД, по рис. 1А). НВ: $t^1 = 40^\circ\text{C}$, $x^1 = 20 \text{ г/кг}$.

Обозначения: 1-2, 3-4 – процесс осушения воздуха в абсорбере; 2-3, 2-5 – основной и вспомогательный воздушные потоки в НИО; $7^1, 7^2, 7^3, 7^4$ – охлажденная в ГРД вода $t^2_{\text{ж}}$ (ГРД, АБР-ГРД, АБР-НИО-ГРД, АБР1-НИО-АБР2-ГРД)

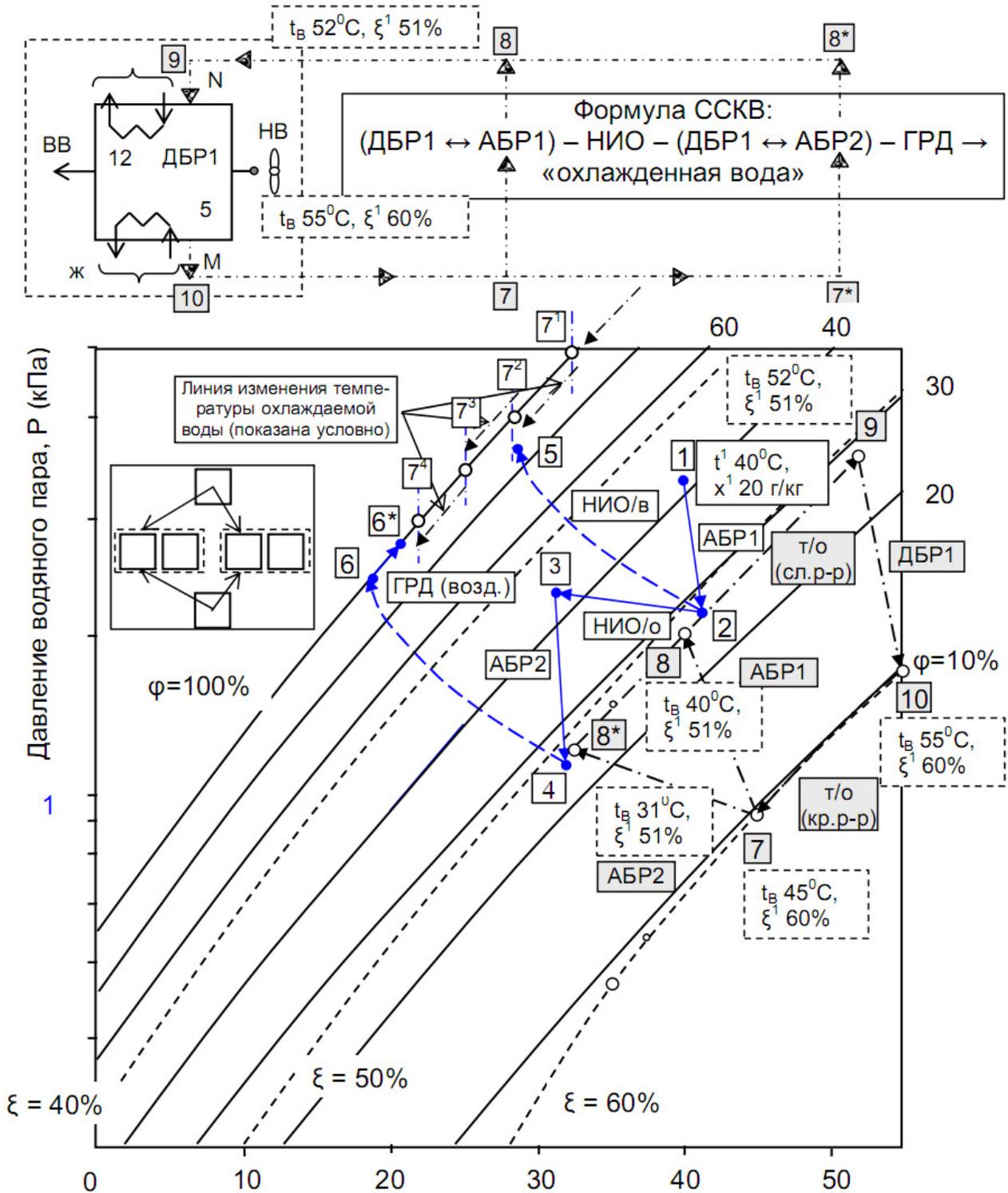


Рис. 5. Схема процессов в СХС на совмещенной диаграмме p - T для раствора LiBr^+ – влажный воздух (формула АБР1-НИО1-АБР2-ГРД, схема по рис. 1А, НВ: $t^1 = 40^\circ\text{C}$, $x^1 = 20$ г/кг).

Показаны: 1-2 и 1*-2* – процессы осушения воздуха в ступенях абсорбера АБР1 и АБР2; 2-4(1*) (основной возд. поток) и 2-5 (вспомогат. возд. поток) – процессы в испарительном охладителе непрямого типа НИО1; 2*-4* и 2*-6-6* – процессы в испарительном охладителе непрямого типа НИО2; 7-8(8*)-9-10 – процессы изменения состояния раствора абсорбента в абсорбере (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2) теплообменнике (8-9, 8*-9 и 10-7) и десорбере (9-10)

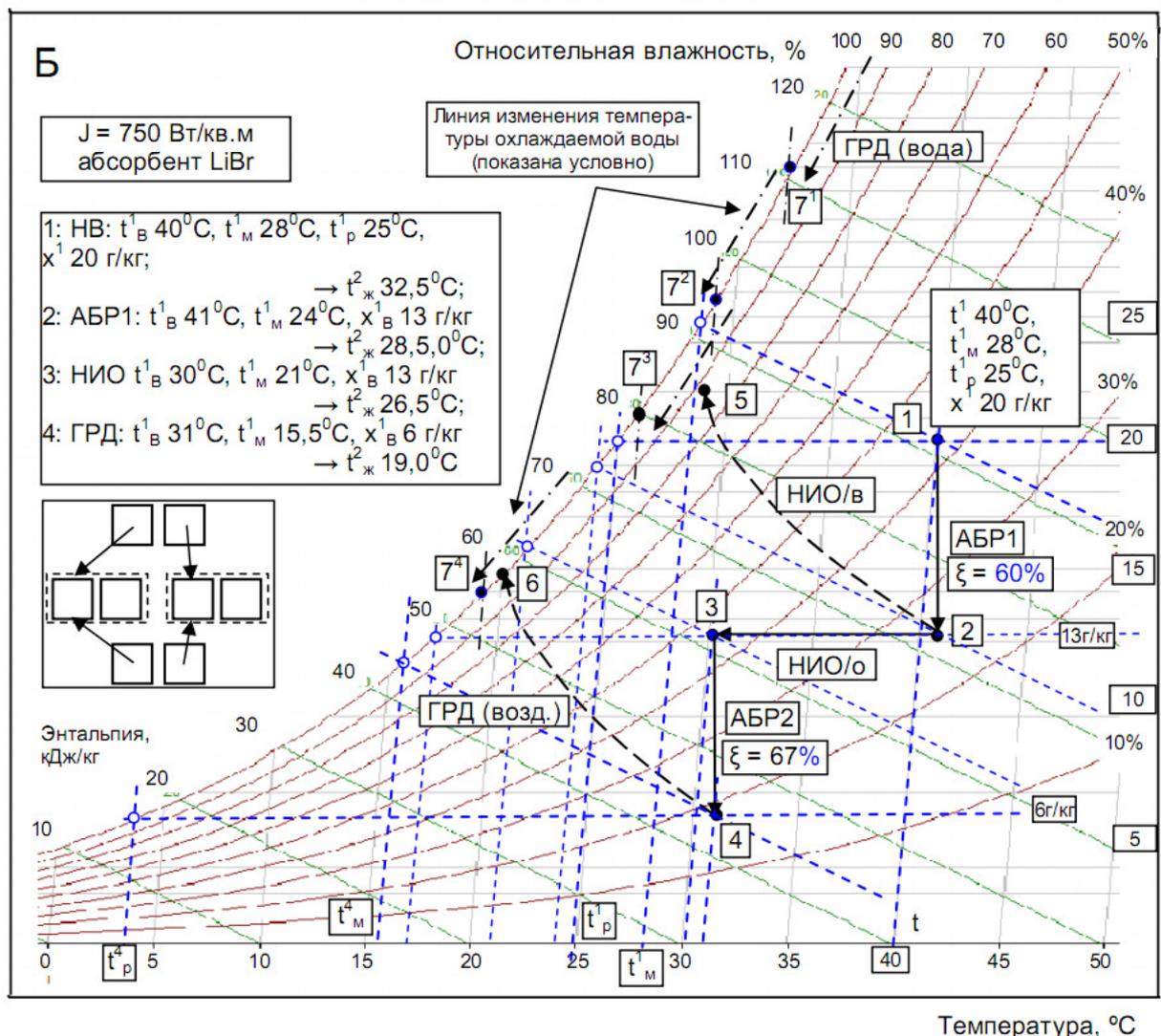
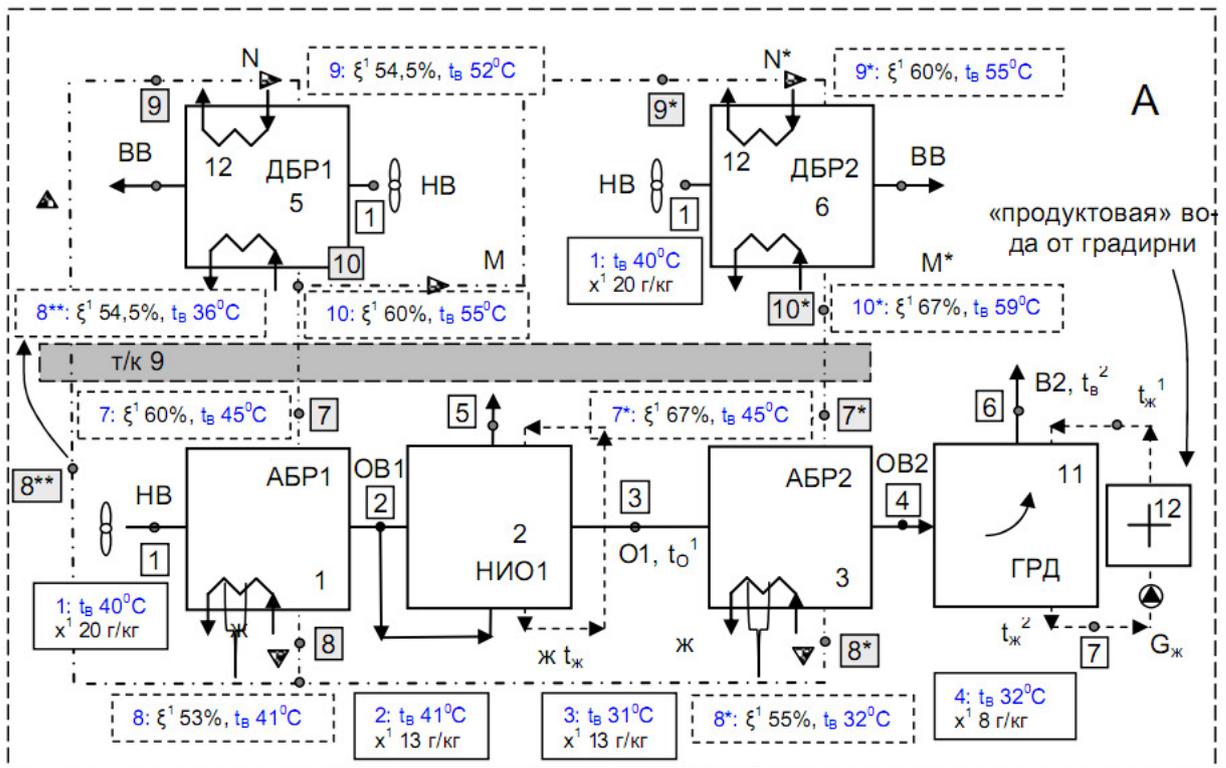


Рис. 6. Принципиальные возможности разработанных СХС.

сти, что обеспечивает: рост предельных нагрузок по газу, исключаяющий до значений скоростей воздуха 6 - 7 м/сек, возникновение «захлебывания» насадочного слоя и высокую равномерность распределения контактирующих потоков по всему объему насадки [1-2]; упрощение коммуникаций между ТМА и создание «линейной» схемы построения систем, что снижает энергозатраты на организацию движения теплоносителей.

II. Анализ возможностей солнечных холодильных систем. Анализ принципиальных возможностей разработанных солнечных холодильных систем рассмотрен на примере двухступенчатых СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером, решенных по формуле: (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР1 ↔ АБР2) – ГРД → «охлажденная вода» (рис. 4 и 5) и СХС с двумя десорберами, решенных по формуле: (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охлажденная вода» (рис. 6).

Двухступенчатая СХС с одним, общим для двух ступеней, десорбером. На рис. 4 в поле Н-Т диаграммы влажного воздуха показано протекание процессов в основных элементах солнечных холодильных систем СХС, оформленных по формуле:

$$[(\text{ДБР1} \leftrightarrow \text{АБР1}) - \text{НИО}] \rightarrow [(\text{ДБР1} \leftrightarrow \text{АБР2}) - \text{ГРД}].$$

Начальное влагосодержание наружного воздуха выбрано значительно выше критической величины $x^* \approx 12,5 \text{ г/кг}$ [1] ($x = 15$ и 20 г/кг), что требует обязательного предварительного осушения воздуха перед испарительным охлаждением. Анализ выполнен на основе ранее полученных в ОГАХ экспериментальных данных по эффективности процессов в ТМА осушительного и охладительного контуров [1-2, 5-10] на насадке из многоканальных многослойных поликарбонатных плит с параметрами слоя: $d_{\text{э}} = 15-25 \text{ мм}$. Использование полимерных многоканальных насадочных структур в случае ИО непрямого типа (НИО) не приводит к сколь либо существенному снижению эффективности процесса, поскольку термическое сопротивление разделяющей каналы стенки соизмеримо с термическим сопротивлением жидкостной пленки, стекающей по внутренним поверхностям каналов. Для НИО была принята в расчетах величина эффективности процесса охлаждения по основному и вспомогательному потокам, равная $E_O = E_B = (t^1 - t^2)/(t^1 - t_M) = 0.65$, при эффективности теплообменников $E_{T/O} = 0.8$. Эта величина определяется соотношением расходов воздушных потоков в НИО, $l = G_O / G_B$. Температура воды, рециркулирующей через «мокрую» часть НИО, принята $t^*_{\text{ж}} = t^1_M + 1.5-2.5^\circ\text{C}$. На самом деле эффективность охлаждения вспомогательного воздушного потока несколько выше, чем основного, величина E_B несколько выше чем E_O , а реальное значение величины $t^*_{\text{ж}}$ зависит от соотношения $l = G_O / G_B$ [1, 2], так что результаты выполненного анализа носят предварительный характер и несколько занижены.

Сравнительный анализ выполнен для начальных параметров наружного воздуха: $t^1_{\text{в}} = 40^\circ\text{C}$, $x^1_{\text{в}} = 20 \text{ г/кг}$, то есть, заведомо, для самых «тяжелых» внешних условий для использования испарительных охладителей сред. Для двухсту-

пенчатых СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером, получены сравнительные результаты (последовательно по ступеням охлаждения), для трех сравниваемых вариантов СХС:

Параметры наружного воздуха НВ в СХС: $t^1_{\text{В}} = 40^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{М}} = 28^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{Р}} = 25^\circ\text{C}$, $x^1 = 20$ г/кг.

1: ГРД $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 32.5^\circ\text{C}$;

2: АБР \rightarrow ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 28.5^\circ\text{C}$;

3: АБР \rightarrow НИО \rightarrow ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 26.5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 \rightarrow НИО \rightarrow АБР2 \rightarrow ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 21.5^\circ\text{C}$.

Видно, что процесс изменения состояния воздушного потока в градирне носит криволинейный характер. Линия изменения состояния вспомогательного воздушного потока в НИО также криволинейна и до выхода из насадки ТМА выходит на кривую $\phi = 100\%$, с определенного момента следуя непосредственно по ней. Построение этих кривых выполнено по методике, разработанной на основе метода «энтальпийного потенциала» в работе [2]. Следует отметить опасность снижения эффективности процесса в этой области, что требует особого анализа. Решение вопроса может лежать на регулировании соотношения воздушных потоков в НИО и потоков газа и жидкости в градирне ГРД.

Достигнутый уровень охлаждения воды $t^2_{\text{Ж}} = 21.5^\circ\text{C}$, соответственно, оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху ($t^1_{\text{М}} = 28^\circ\text{C}$) и даже ниже его точки росы ($t^1_{\text{Р}} = 25^\circ\text{C}$). Результаты анализа приведены также на совмещенной диаграмме p - T для раствора (LiBr^+ – влажный воздух), рис. 5. Здесь показаны процессы изменения состояния раствора абсорбента в абсорберах по ступеням охладителя (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), в теплообменнике (8(8*)-9 и 10-7) и десорбере-регенераторе (9-10, ДБР). Такой анализ выполнен впервые и позволяет одновременно и наглядно видеть возможности СХС и пути повышения эффективности, особенно при росте концентрации абсорбента.

Двухступенчатая СХС с двумя десорберами. Основной вариант разработанной СХС с двухступенчатым десорбером ДБР приведен на рис. 6А по формуле:

$$[(\text{ДБР1} \leftrightarrow \text{АБР1}) - \text{НИО}] - [(\text{ДБР1} \leftrightarrow \text{АБР2}) - \text{ГРД}].$$

Оптимально использование двухступенчатого варианта десорбера, когда каждая его ступень обеспечивает последующий рост концентрации абсорбента и связана в работе с соответствующей ступенью абсорбера. В поле H - T диаграммы влажного воздуха приведен анализ работы СХС по ступеням охлаждения для двух уровней концентрации абсорбента (ξ^1 60% и 67% на входе в ступени охлаждения; ориентировочный предельный уровень концентраций для LiBr^{++} составляет 70-75% [1]) и начальных параметров воздуха НВ: $t^1_{\text{В}} = 40^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{М}} = 28^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{Р}} = 25^\circ\text{C}$, $x^1 = 20$ г/кг. Получено:

1: ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 32.5^\circ\text{C}$;

2: АБР \rightarrow ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{Ж}} = 28.5^\circ\text{C}$;

3: АБР → НИО → ГРД: → $t_{\text{ж}}^2 = 26.5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 → НИО → АБР2 → ГРД: → $t_{\text{ж}}^2 = 19.0^\circ\text{C}$

На рис. 6 показаны: 1-2 и 3-4 – процессы осушения воздуха в ступенях абсорбера АБР1 и АБР2; 2-3 и 2-5 – основной и вспомогательный воздушные потоки в испарительном охладителе непрямого типа НИО; $7^1, 7^2, 7^3, 7^4$ – охлажденная в ГРД вода $t_{\text{ж}}^2$ (соответственно в ГРД, АБР-ГРД, АБР-НИО-ГРД, АБР1-НИО-АБР2-ГРД). Видно, как рост концентрации абсорбента снижает достигаемый уровень влагосодержания, и, соответственно, общий уровень охлаждения среды.

Выводы:

1. Многофункциональные солнечные системы основаны на теплоиспользующем абсорбционном цикле открытого типа и состоят из осушительной (абсорбер-осушитель – десорбер-регенератор) и охладительной части, в составе испарительных охладителей газов и жидкостей; поддержание непрерывности цикла обеспечивает солнечная система на основе жидкостных плоских солнечных коллекторов.
2. Использование многоступенчатого абсорбера для осушения воздушного потока, как и использование многоступенчатого десорбера для восстановления концентрации абсорбента, обеспечивают рост эффективности процесса абсорбции и существенное снижение пределов последующего испарительного охлаждения сред (газов или жидкостей).

Литература:

1. *Дорошенко А.В., Глауберман М.А.* Альтернативная энергетика. Солнечные системы тепло-хладоснабжения / монография /. – Одесса: ОНУ, 2012. – 446 с.
2. *Дорошенко А.* Компактная тепломассообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). / Докторская диссертация, Одесский институт низкотемпературной техники и энергетике. / Одесса. – 1992. – Т. 1. – 350 с.; Т. 2. – 260 с.
3. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 848 с.
4. *John L., McNAB, Paul McGregor.* Dual indirect cycle air-conditioner uses heat concentrated desiccant and energy recovery in a polymer plate heat exchanger // 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF. – Washington, 2003.
5. *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.
6. *Chen G.M., Doroshenko A.V., Shestopalov K.O., Khliyeva O.Y.* Evaporative coolers of water and air for cooling systems. Analysis and perspectives // 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. – Hangzhou, 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. *Koltun P., Ramakrishnan S., Doroshenko A., Kontsov M.* Life Cycle assessment of a conventional and alternative air-conditioning systems. // 21 International Congress of Refrigeration IIR/IIF. – Washington, 2003. – P. 45-57.
9. *Дорошенко А.В., Антонова А.Р., Людницький К.В.* Солнечные многоступенчатые абсорбционные холодильные системы на основе тепломасообменных аппаратов пленочного типа // Холодильная техника и технология. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 25-31.
10. *Дорошенко А.В., Людницький К.В.* Солнечные холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением // Холодильная техника и технология. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 42-52.

***Glauberman M.A., Doroshenko M.A., Kirillov V. Kh. Antonova A.R.,
Lyudnitsky K.V.***

**Solar multi-stage refrigeration systems.
New developments and analysis of possibilities**

SUMMARY

The developed schematics for the solar refrigeration systems, based on the use of absorbing cycle and solar energy for the regeneration of absorbent solution, are presented in the article. Cascade (two-stage) principle of construction of contours is used with growth of concentration of absorbent on the stages of cascade. Heat-mass-transfer apparatus of film-type, entering in the complement of contours compatible and executed on the basis of multichannel compositions from polymeric materials. The peculiarities of film-type flows are considered theoretically in the heat-mass-transfer apparatus of the basic planetary systems. The preliminary comparative analysis of possibilities of the solar refrigeration systems is performed.

***Глауберман М.А., Дорошенко О.В., Кириллов В.Х., Антонова А.Р.,
Людницький К.В.***

**Сонячні абсорбційні холодильні системи.
Принципи побудови і аналіз можливостей**

АНОТАЦІЯ

Розроблено схемні рішення для альтернативних холодильних систем, заснованих на використанні теплостосованого абсорбційного циклу і сонячної енергії для регенерації розчину абсорбенту. Використано двоступінчатий принцип побудови осушного і охолоджувального контурів із зростанням концентрації абсорбенту по ступенях каскаду. Тепло-масообмінна апаратура плівкового типу, що входить до складу осушного і охолоджувального контурів, уніфікована і побудована на основі моноблокових багатоканальних композицій з полімерних матеріалів. Виконано, на підставі експериментальних даних по ефективності процесів тепломасообміну в апаратах осушного і охолоджувального контурів сонячних систем, порівняльний аналіз можливостей розроблених холодильних систем.