



SOLAR MULTI-STAGE REFRIGERATION SYSTEMS. NEW DEVELOPMENTS AND ANALYSIS OF POSSIBILITIES

Alexsandr DOROSHENKO, Alfiia ANTONOVA, Konstantin LUDNICKIY
Odessa national academy of food technologies

Abstract - Schematics are worked out for the alternative refrigeration systems based on the use of absorbing cycle and solar energy for maintenance of continuity of process (regenerations of absorbent solution). Two-stage principle of construction is used drying and cool contours with growth of concentration of absorbent on the stages of cooling. Heat-mass-transfer apparatus of film type, entering in the complement of drying and cool contours of the solar systems, is compatible and executed on the basis of multichannel compositions from polymeric materials. Executed, on the basis of results of design of processes of joint heat-mass-transfer in the evaporated coolers of indirect type and experimental data on efficiency of processes in apparatus of drying and cool contours, comparative analysis of possibilities of the worked out solar refrigeration systems and systems of air conditioning.

Keywords - Solar systems, drainage of air, evaporative cooling (direct and indirect), heat-mass-transfer apparatus, film-type flows, absorption, desorption.

SISTEME SOLARE ABSORBȚIONALE MULTIFUNCȚIONALE ANALIZA OPORTUNITĂȚILOR ȘI PRINCIPII DE REALIZARE

Alexandr DOROȘENKO, Alfiia ANTONOVA, Konstantin LIUDNIȚCHI
Academia națională a tehnologiilor alimentare din Odessa

Rezumat – Sunt elaborate soluțiile schemelor pentru sistemele de răcire alternative, bazate pe ciclul termoabsorbant și pe energia solară pentru menținerea continuității procesului (regenerarea soluției absorbantului). Este utilizat principiul din două trepte la construirea conturului de uscare și a celui de răcire cu creșterea concentrației absorbantului la diferite trepte de răcire. Utilajul de tip peliculă a schimbului de căldură-masă, inclusă în componența conturului de răcire și a celui de uscare a sistemelor solare este unificat și realizat în baza compozițiilor monobloc multicanal din materiale de polimer. În baza rezultatelor modelării proceselor schimbului mixt de masă și căldură în răcitoarele cu evaporare de tip indirect și a datelor experimentale de eficiență a proceselor în aparatele conturului de uscare și a celui de răcire este realizată analiza comparativă a oportunităților sistemelor elaborate a frigiderelor solare și a sistemelor de condiționare a aerului.

Cuvinte-cheie – Sisteme solare, uscarea aerului, răcirea mediilor, aparatură de schimb de masă și căldură, scurgeri de tip peliculă, absorbție, desorbție, răcire prin evaporate.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ АБСОРБЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, К.В. Людницкий
Одесская национальная академия пищевых технологий

Реферат – Разработаны схемные решения для альтернативных холодильных систем, на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла и солнечной энергии для поддержания непрерывности процесса (регенерации раствора абсорбента). Использован двухступенчатый принцип построения осушительного и охладительного контуров с возрастанием концентрации абсорбента по ступеням охлаждения. Тепло-массообменная аппаратура пленочного типа, входящая в состав осушительного и охладительного контуров солнечных систем, унифицирована и выполнена на основе моноблочных многоканальных композиций из полимерных материалов. Выполнен, на основании результатов моделирования процессов совместного теплообмена в испарительных охладителях непрямого типа и экспериментальных данных по эффективности процессов в аппаратах осушительного и охладительного контуров, сравнительный анализ возможностей разработанных солнечных холодильных систем и систем кондиционирования воздуха.

Ключевые слова - Солнечные системы, осушение воздуха, охлаждение сред, теплообменная аппаратура, пленочные течения, абсорбция, десорбция, испарительное охлаждение.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные многофункциональные холодильные системы, основанные на теплоиспользующем

абсорбционном цикле могут обеспечивать комплексное решение задач осушения воздуха, теплохладоснабжения и кондиционирования [1,4,10]. В этих системах предварительное осушение воздуха

обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения сред в солнечных холодильных системах СХС [1, 5-9, 12-13]. Разработанные решения для многоступенчатых охладителей охватывают нужды энергетики, химической и пищевой технологий и позволяют решать задачи охлаждения, не прибегая к традиционной пароконденсационной технике. Это позволяет также существенно улучшить их энергетические показатели [11].

I. РАЗРАБОТКА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ АБСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМ

Авторами рассматривается построение солнечных систем кондиционирования воздуха ССКВ на основе блока [(ДБР↔АБР) – НИО], где предварительное осушение наружного воздуха в абсорбере обеспечивает последующее глубокое охлаждение основного воздушного потока «О» в каналах испарительного воздухоохлаждителя непрямого типа НИО, и солнечных холодильных систем СХС на основе блока [(ДБР↔АБР) – ГРД], где обеспечивается глубокое испарительное охлаждение воды. На рис. 1 приведена компоновка основных блоков солнечных абсорбционных систем. Из таких автономных блоков строится многофункциональная система в двух- или трехступенчатых вариантах.

Принципы построения многоступенчатых солнечных систем ССКВ и СХС показаны на рис. 1. Градирня технологического назначения ГРДт обслуживает абсорбер АБР. Поддержание непрерывности осушительно-испарительного цикла обеспечивается солнечной регенерацией абсорбента в десорбере-регенераторе (ДБР). Требуемый температурный уровень десорбции обеспечивается солнечной системой на основе жидкостных плоских солнечных коллекторов СКж (8) и баком-теплоаккумулятором БТА с дополнительным греющим источником 12 (электрод- 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 авторами плоские жидкостные солнечные коллекторы, на основе полимерных многоканальных структур (теплоприемник и прозрачное покрытие СКж) [1, 5-9, 12-13]. Представлены разработанные, на основе указанных основных блоков, солнечные системы кондиционирования воздуха ССКВ (рис. 1А) и холодильные системы СХС (рис. 1Б и В). СХС (рис. 1Б) выполнена в двухступенчатом варианте, и состоит из автономных осушительно-охлаждительных блоков, первый блок решен по формуле [(ДБР↔АБР)–НИО] (в составе элементов 1 и 3), а во втором [(ДБР↔АБР)–ГРД] (элементы 3 и 14), причем каждая ступень регенерации (ДБР, элементы 5 и 6) замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР, элементы 1 и 3), соответственно.

Основная концепция создания таких систем основана на следующих положениях: десорбер-регенератор (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; 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); внутренняя рекуперация тепла обеспечивается системой теплообменников: на линиях горячий-крепкий (М) и холодный-слабый (N) растворы бромистого лития LiBr; в охлаждающей части СХС последовательно используется в первой ступени охлаждения воздухоохлаждитель непрямого типа НИО (2), включенный в схему после соответствующей ступени абсорбции; во второй ступени СХС – градирня ГРД (14).

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

2. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ АБСОРБЦИОННЫХ СИСТЕМ

Анализ принципиальных возможностей разработанных ССКВ был рассмотрен на примере двухступенчатых ССКВ с одним (единым для двух степеней) десорбером, решенная по формуле: (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР1 ↔ АБР2) – НИО2 → «О» (рис. 2) и ССКВ с двумя десорберами, решенная по формуле: (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НИО2 → «О».

Двухступенчатая (двухкаскадная) ССКВ с одним (единым для двух степеней) десорбером. Охлаждение абсорберов-осушителей обеспечивается единой градирней технологического назначения ГРДт, либо несколькими водоохлаждителями, причем в каждом последующем используется часть уже осушенного наружного воздуха в абсорбере предыдущей ступени каскада, либо часть осушенного и охлажденного воздуха в предыдущей ступени НИО

(рис. 1А, позиция Д). Поддержание требуемого температурного уровня десорбции водяных паров из раствора абсорбента (восстановление концентрации абсорбента) обеспечивает солнечная система ССГВ в составе требуемой площади солнечных жидкостных коллекторов СКж и бака-теплоаккумулятора БТА. Здесь и далее при анализе условия для наружного воздуха были приняты в самом тяжелом варианте, как по его температуре (t^1 40°C), так и по влагосодержанию (x^1 20 г/кг), чтобы наглядно выявить предельные возможности разрабатываемых ССКВ. Все результаты получены на основе теоретического и экспериментального исследований авторов, опираясь на зависимости эффективности процессов от определяющих параметров (расходы газа и жидкости в ТМА осушительного и охладительного контуров и начальные температуры и влагосодержания контактирующих потоков, а также концентрацию раствора абсорбента). Результаты анализа приведены на рис. 2Б на Н-Т диаграмме влажного воздуха. Получено (последовательно по ступеням ССКВ):

1: НВ: t^1 40°C, t^1_M 28°C, t^1_P 25°C, x^1 20 г/кг;

2: АБР1: (ξ^1 60%-51%), t^2 41°C, x^2 13 г/кг;

4: НИО1 (основной поток воздуха):

t^4 31°C; x^2 13 г/кг;

5: НИО1 (вспомогательный поток воздуха) :

t^5 29,5°C, ϕ 86%;

2*: АБР2: (ξ^1 60%-51%), t^{2*} 32°C, x^{2*} 8 г/кг;

4*: НИО2 (основной поток воздуха):

t^4 23,5°C; x^{2*} 8 г/кг;

5*: НИО2 (вспомогательный поток воздуха):

t^5 21-22,5°C, ϕ 100%

Первая ступень абсорбера обеспечивает снижение влагосодержания от 20 до 13 г/кг, вторая до 8 г/кг. Температура осушаемого в абсорбера воздушного потока несколько возрастает. Это определяется оптимизацией энергозатрат на охлаждение соответствующего абсорбера (по ступеням охладителя), на привод вентилятора и жидкостных насосов, в первую очередь речь идет о градирне технологического назначения, обслуживающей соответствующий абсорбер. Правильнее использовать две градирни (рис. 1А), причем так, чтобы вторая, сориентированная на охлаждение АБР2, использовала частично уже осушенный в АБР1 воздушный поток. Температура вспомогательного потока воздуха несколько ниже, чем у основного, но его относительная влажность, особенно с понижением общего температурного уровня при переходе ко второй ступени охлаждения, практически равна 100% (линия процесса 2*-6-6*). Здесь существует опасность полного насыщения воздушного потока еще до его выхода из насадки ТМА и резкого снижения эффективности охлаждения как по основному, так и по вспомогательному воздушным потокам. Решение задачи лежит в перераспределении соотношения расходов $l = G_o / G_v$. Для первой ступени охлаждения (НИО1) может быть принято значение $l = 1,0$, для последующей (НИО2), расход G_v следует увеличивать, перераспределяя тепловую нагрузку на «сухую» и «мокрую» части НИО. Достигнутый

уровень охлаждения $t_o = 23,5^\circ\text{C}$ оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху (t^1_M 28°C) и даже ниже его точки росы (t^1_P 25°C). Даже для очень тяжелых параметров наружного воздуха разработанная ССКВ однозначно обеспечивает получение требуемых комфортных параметров воздушной среды в обслуживаемом помещении. Результаты анализа приведены также на совмещенной диаграмме р-Т для раствора (LiBr+ – влажный воздух), рис. 2Б. Здесь показаны процессы изменения состояния раствора абсорбента в абсорберах по ступеням охладителя (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), теплообменнике (8-9, 8*-9 и 10-7) и десорбере-регенераторе (9-10, ДБР). Потоки слабого раствора абсорбента по ступеням АБР1 и АБР2 имеют различную температуру (на самом деле и концентрация абсорбента у них несколько различна) и смешиваются перед теплообменником.

Двухступенчатая (двухкаскадная) ССКВ с двумя десорберами, решенная по формуле (ДБР↔АБР1)–НИО1–(ДБР2↔АБР2)–НИО2→«О». Двухступенчатый вариант десорберов ДБР приведен на рис. 1А. Оптимально использование двухступенчатого варианта, когда каждая его ступень обеспечивает последующий рост концентрации абсорбента и связана в работе с соответствующей ступенью абсорбера. Получено (последовательно по ступеням ССКВ):

1: НВ: t^1 40°C, t^1_M 28°C, t^1_P 25°C, x^1 20 г/кг;

2: АБР1: (ξ^1 60%-53%), t^2 41°C, x^2 13 г/кг;

4: НИО1 (основной поток воздуха):

t^4 30°C; x^2 13 г/кг;

5: НИО1 (вспомогательный поток воздуха) :

t^5 28,5°C, ϕ 86%;

2*: АБР2: (ξ^1 67%-55%), t^{2*} 32°C, x^{2*} 6,5 г/кг;

4*: НИО2 (основной поток воздуха):

t^4 21,0°C; x^{2*} 6,5 г/кг;

5*: НИО2 (вспомогательный поток воздуха):

t^5 20,0°C, ϕ 100%

Здесь достигнут более глубокий уровень охлаждения, чем в случае схемы с одним десорбером, $t_o = 21,0^\circ\text{C}$. Он оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху (t^1_M 28°C) и ниже его температуры точки росы (t^1_P 25°C). Видно, что для очень тяжелых параметров наружного воздуха ССКВ однозначно обеспечивает получение требуемых комфортных параметров воздушной среды в обслуживаемом помещении. Число требуемых ступеней охлаждения [(ДБР↔АБР)–НИО] в охладителе ССКВ определяется степенью трудности решаемой задачи, и, например, для условий Украины и Европы в целом, можно обойтись одноступенчатым вариантом ССКВ.

Анализ принципиальных возможностей разработанных солнечных холодильных систем СХС рассмотрен на примере двухступенчатых СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером, решенных по формуле: (ДБР1↔АБР1)–НИО1–(ДБР1↔АБР2)–ГРД→«охлажденная вода» (рис. 3). Получено (последовательно по ступеням охлаждения, рис. 3):

1: НВ: t^1_B 40°C, t^1_M 28°C, t^1_P 25°C, x^1 20 г/кг;

- ГРД → $t_{ж}^2 32,5^{\circ}\text{C}$;
 2: АБР1: $t_{в}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 24,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг
 АБР → ГРД: → $t_{ж}^2 28,5^{\circ}\text{C}$;
 3: НИО: $t_{в}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 22^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг
 АБР → НИО → ГРД: → $t_{ж}^2 26,5^{\circ}\text{C}$;
 4: ГРД: $t_{в}^1 31,8^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 17,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 8,0$ г/кг
 АБР1 → НИО → АБР2 → ГРД: → $t_{ж}^2 21,5^{\circ}\text{C}$

Достигнутый уровень охлаждения воды $t_{ж}^2 = 21,5^{\circ}\text{C}$ оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху ($t_{м}^1 28^{\circ}\text{C}$) и даже ниже его точки росы ($t_{р}^1 25^{\circ}\text{C}$). Результаты анализа приведены также на совмещенной диаграмме р-Т для раствора (LiBr+ – влажный воздух), рис. 3Б. Здесь показаны процессы изменения состояния раствора абсорбента в абсорберах по ступеням охладителя (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), в теплообменнике (8**) и (10-7) и десорбере-регенераторе (9-10, ДБР). Были также получены сравнительные результаты для этого варианта СХС на внешних начальных условиях $t^1 40^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг ($t_{м}^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 25,0^{\circ}\text{C}$) и $t^1 35^{\circ}\text{C}$, $x^1 15$ г/кг ($t_{м}^1 24^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 20,5^{\circ}\text{C}$). Для последних, существенно более «легких» условий, получено:

- 1: НВ: $t_{в}^1 35^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 24^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 20,5^{\circ}\text{C}$, $x^1 15$ г/кг;
 ГРД → $t_{ж}^2 29,0^{\circ}\text{C}$;
 2: АБР1: $t_{в}^1 36^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 20,0^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 9$ г/кг
 АБР → ГРД: → $t_{ж}^2 24,5^{\circ}\text{C}$;
 3: НИО: $t_{в}^1 27^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 17^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 9$ г/кг
 АБР → НИО → ГРД: → $t_{ж}^2 21,0^{\circ}\text{C}$;
 4: ГРД: $t_{в}^1 27,5^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 11,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 3,0$ г/кг
 АБР1 → НИО → АБР2 → ГРД: → $t_{ж}^2 15,0^{\circ}\text{C}$

Определяющую роль в этом результате играет в первую очередь начальное влагосодержание воздуха. Двухступенчатая (двухкаскадная) СХС с двумя десорберами по формуле: НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР1 ↔ АБР2) – ГРД → «охлажденная вода». Был проведен анализ работы СХС по ступеням охлаждения для двух уровней концентрации абсорбента (ориентировочный предельный уровень концентраций для LiBr++ составляет 70-75):

- ($\xi^1 60\%$ и 67% на входе в ступени охлаждения):
 1: НВ: $t_{в}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг; → $t_{ж}^2 32,5^{\circ}\text{C}$;
 2: АБР1: $t_{в}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 24^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг, → $t_{ж}^2 28,5^{\circ}\text{C}$;
 3: НИО: $t_{в}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 21^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг, → $t_{ж}^2 26,5^{\circ}\text{C}$;
 4: ГРД: $t_{в}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 15,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 6$ г/кг, → $t_{ж}^2 19,0^{\circ}\text{C}$
 – ($\xi^1 69\%$ и 75% на входе в ступени охлаждения):
 1: НВ: $t_{в}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг; → $t_{ж}^2 32,5^{\circ}\text{C}$;
 2: АБР1: $t_{в}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 21,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 10,5$ г/кг, → $t_{ж}^2 25,5,0^{\circ}\text{C}$;
 3: НИО: $t_{в}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 18,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 10,5$ г/кг, → $t_{ж}^2 22,5^{\circ}\text{C}$;
 4: ГРД: $t_{в}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 9,0^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 1,5$ г/кг, → $t_{ж}^2 13,0^{\circ}\text{C}$

Видно, как рост концентрации абсорбента снижает достигаемый уровень влагосодержания, и, соответственно, общий уровень охлаждения среды.

Двухступенчатая (двухкаскадная) СХС с двумя десорберами и использованием части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2 (схема СХС приведена на рис. 1В).

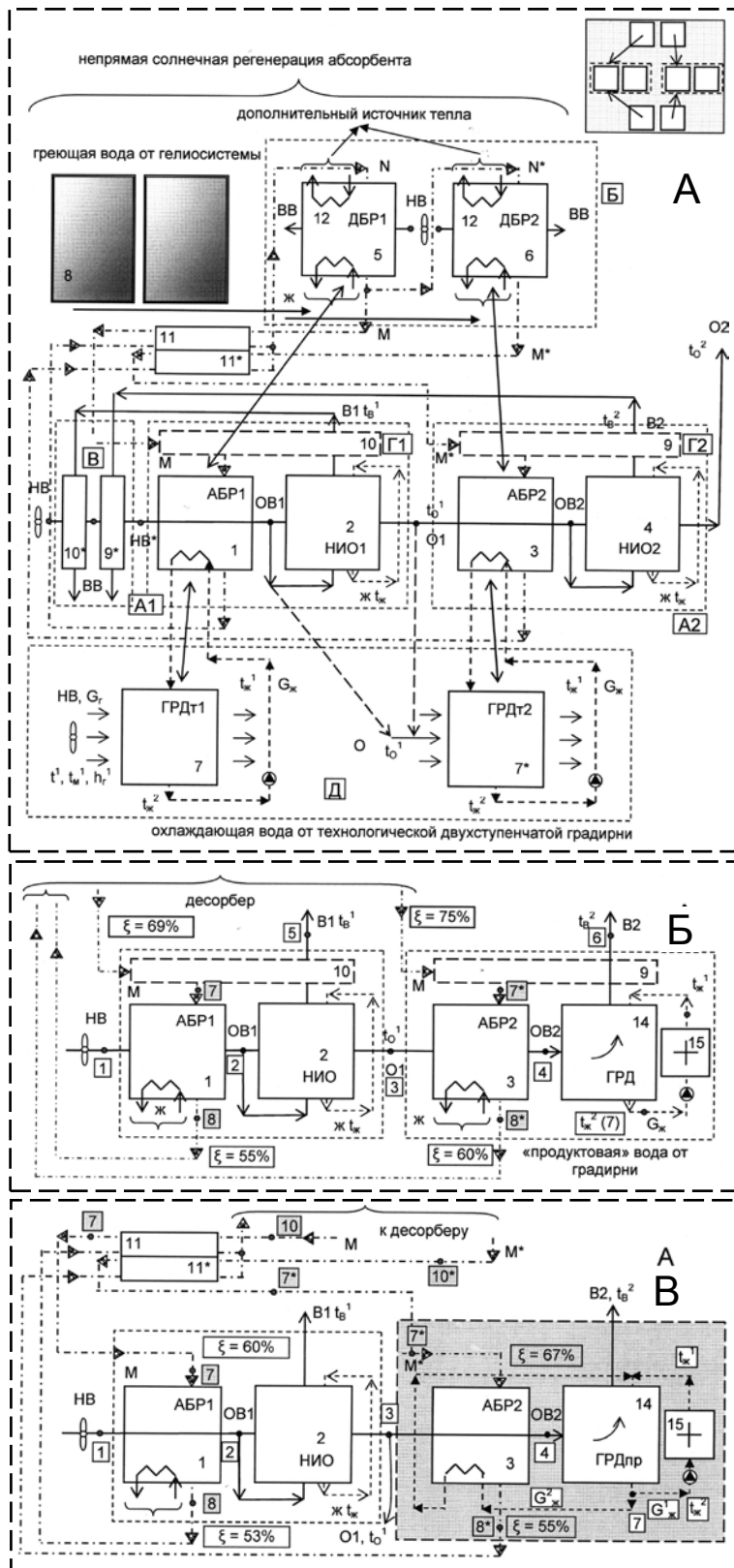
Получено:

- 1: НВ: $t_{в}^1 40^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 28^{\circ}\text{C}$, $t_{р}^1 25^{\circ}\text{C}$, $x^1 20$ г/кг, → $t_{ж}^2 32,5^{\circ}\text{C}$;
 2: АБР1: $t_{в}^1 41^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 24^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг, → $t_{ж}^2 28,5^{\circ}\text{C}$;
 3: НИО1: $t_{в}^1 30^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 21^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 13$ г/кг, → $t_{ж}^2 26,5^{\circ}\text{C}$;

- 4: ГРД: $t_{в}^1 31^{\circ}\text{C}$, $t_{м}^1 15,5^{\circ}\text{C}$, $x_{в}^1 4$ г/кг, → $t_{ж}^2 15,0^{\circ}\text{C}$;

Процесс осушения воздуха в низкотемпературном абсорбере АБР2 реализуется при одновременном его охлаждении, причем линия изменения состояния воздушного потока носит криволинейный характер. Линия изменения состояния воздушного потока в градирне также криволинейна и до выхода из насадки ТМА выходит на кривую $\phi = 100\%$, с определенного момента следуя непосредственно по ней (участок 4-6-6*).

Анализ полученных результатов. Разработанные ССКВ однозначно обеспечивают получение требуемых параметров комфортности воздуха при самых тяжелых внешних условиях. Возможная степень осушения воздушного потока при различных конфигурациях солнечных систем СХС и ССКВ иллюстрируется графиками зависимости достигаемой степени осушения воздуха $\Delta x_{в}$ от определяющих параметров наружного воздуха: влагосодержания, температуры и концентрации абсорбента (рис. 4А). Величина $\Delta x_{в}$ характеризует и реальный эффект испарительного охлаждения в СХС. Сравнительный уровень охлаждения солнечных холодильных систем СХС при использовании части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР (анализ выполнен для различных параметров наружного воздуха): варьировался относительный расход жидкости, идущей на охлаждение АБР, $I^* = G_{ж}^1 / G_{ж}^2$, при сохранении соотношения $I = G_{г} / G_{ж}^1 = 1,0$, которое для работы градирни является оптимальным. Увеличение доли охлажденной воды, идущей на охлаждение АБР существенно снижает уровень охлаждения, но при этом, естественно снижается производительность СХС по охлаждаемой воде, поступающей потребителю. Результаты анализа, приведенные на рис. 4Б для десяти вариантов разработанных солнечных холодильных систем СХС иллюстрируют их сравнительные возможности с точки зрения достигаемого уровня охлаждения. Самый глубокий уровень охлаждения обеспечивают двухступенчатые охладители, причем уровень охлаждения определяется ростом концентрации абсорбента от ступени к ступени охлаждения. Несомненный интерес представляет вариант СХС по формуле (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД с использованием части «продуктовой» воды от «продуктовой» градирни ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2 (рис. 1В). Для европейских условий солнечные абсорбционные СХС обеспечивают получение заоложенной воды на уровне $8-10^{\circ}\text{C}$, что позволяет обслуживать ряд пищевых технологий, не прибегая к пароконденсационным охладителям. Дальнейшее снижение температурного уровня охлаждения связано с переходом к трехступенчатому СХС, или с ростом концентрации абсорбента, что связано с увеличением



Формула ССКВ: (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НИО2 → «О»

Варианты схемных решений ССКВ:

А и Б - использование двухступенчатого десорбера-регенератора, в котором каждая ступень регенерации абсорбента замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха, с последовательным ростом концентрации крепкого раствора от АБР1 к АБР2; В - использование двухступенчатой технологической градирни, обслуживающей соответствующие ступени абсорбции АБР1 и АБР2, при этом ГРДт1 работает на наружном воздухе, а ГРДт2 на части осушенного в АБР1 наружного воздушного потока и охлажденного в НИО1 основного воздушного потока

Формула СХС: НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охлажденная вода» (повышение концентрации абсорбента до 69 - 75%)

Формула СХС: НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД → «охлажденная вода»

Рисунок 1. Принципиальные схемы разработанных ССКВ (А) и СХС (Б) в варианте использования двухступенчатой технологической градирни, обслуживающей соответствующие ступени абсорбции АБР1 и АБР2; СХС (В) с использованием части охлажденной «продуктовой» воды для охлаждения абсорбера второй ступени. Обозначения: 1, 3 – абсорбер-осушитель наружного воздуха, АБР; 2 – испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИО; 5, 6 – десорбер-регенератор; 7, 7* – градирни технологического назначения ГРДт; 8 – солнечная система, обеспечивающая процесс регенерации абсорбента на основе СКж; 9-11 – теплообменники; 12 – дополнительный греющий источник; 14 – «продуктовая» основная градирня ГРДпр. НВ – наружный воздух; ОВ – осушенный воздух; О – «основной» воздушный поток; В – «вспомогательный» воздушный поток для НИО; выбрасываемый в среду воздух из градирен ГРДт и ГРДпр; N, M – крепкий и слабый растворы абсорбента

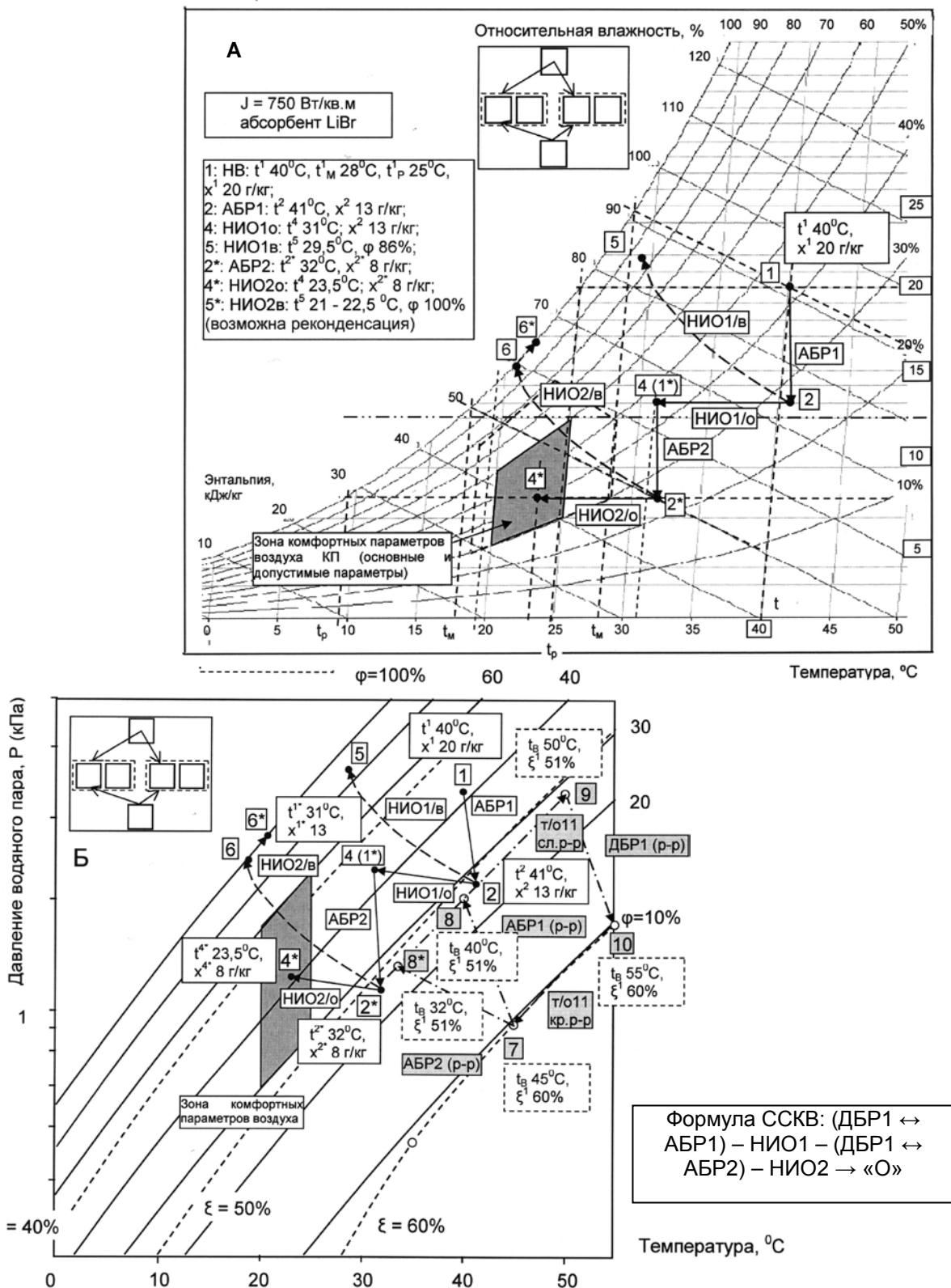


Рисунок 2. Изображение процессов в ССКВ на совмещенной диаграмме р-Т для раствора LiBr+ – влажный воздух (формула АБР1-НИО1-АБР2-НИО2. Показаны: 1-2 и 1*-2* – процессы осушения воздуха в ступенях абсорбера АБР1 и АБР2; 2-4(1*) (основной возд. поток) и 2-5 (вспомогат. возд. поток) – процессы в НИО1; 2*-4* и 2*-6-6* – процессы в 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)

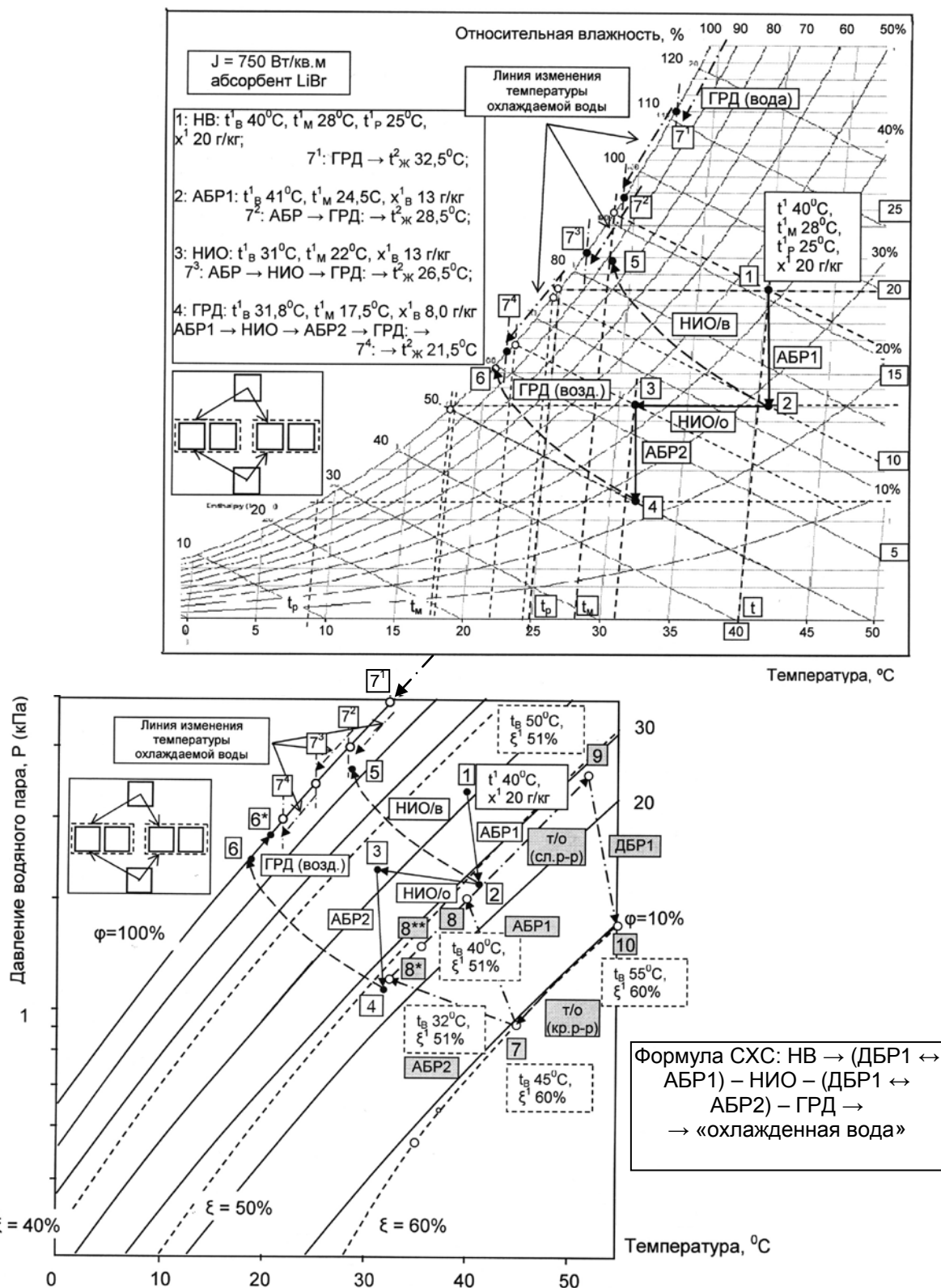


Рисунок 3. Принципиальные возможности разработанных СХС (формула АБР1-НИО1-АБР2-ГРД).
 НВ: $t^1 40^\circ\text{C}$, $x^1 20 \text{ г/кг}$.
 Обозначения: 1-2, 3-4 – процесс осушения воздуха в абсорбере; 2-3, 2-5 – основной и вспомогательный воздушные потоки в НИО; $7^1, 7^2, 7^3, 7^4$ – охлажденная в ГРД вода $t^2_{ж}$ (ГРД, АБР-ГРД, АБР-НИО-ГРД, АБР1-НИО-АБР2-ГРД)

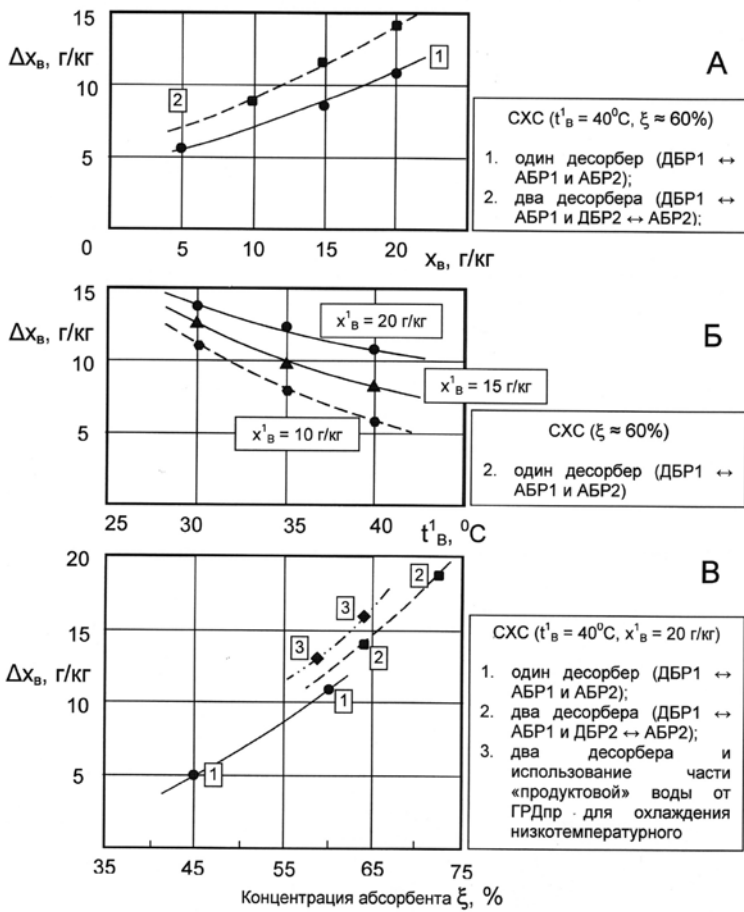


Рисунок 4. Принципиальные возможности разработанных солнечных холодильных систем на основе открытого абсорбционного цикла с точки зрения достигаемого уровня осушения воздуха. А, Б, В - Влияние основных параметров работы системы, начальных параметров воздуха и концентрации абсорбента Г. Различные формулы солнечной холодильной системы

Формулы разработанных СХС

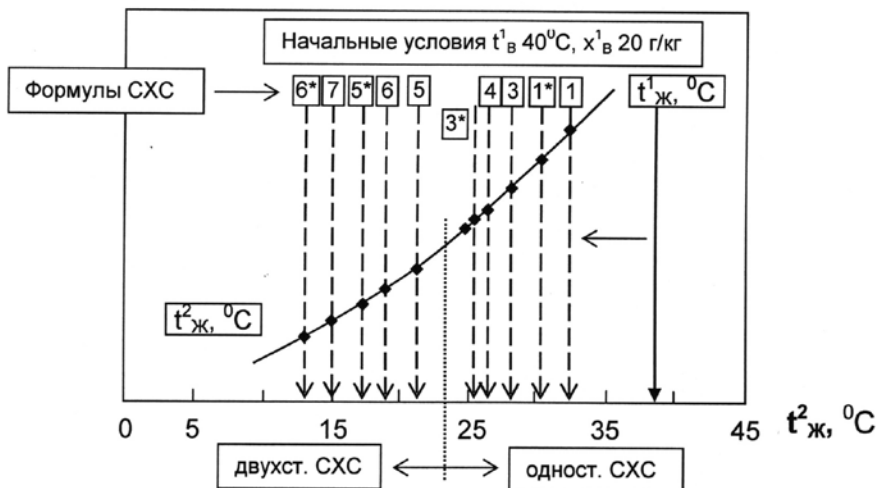
Одноступенчатые варианты СХС:

- НВ → ГРД
- 1* НВ → т/к ↔ ГРД
- НВ → НИО → ГРД
- НВ → АБР → ГРД; (3* НВ → АБР ↔ ГРД)
- НВ → АБР → НИО → ГРД

Двухступенчатые варианты СХС:

- НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР1 ↔ АБР2) – ГРД
- 5* НВ → АБР1 → НИО1 → АБР/ИО-Рж
- 6 НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД ($\xi = 60 - 67\%$)
- 6* НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД ($\xi = 69 - 75\%$)
- НВ → (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД

Г



энергозатрат и опасностью кристаллизации вблизи критической линии для абсорбента. Разработанные СХС могут найти успешное применение и в решении задач традиционной энергетики, холодильной и криогенной техники, а также в системах кондиционирования воздуха, комфортного и технологического назначения. Результаты выполненного экологического анализа традиционной и альтернативной систем кондиционирования воздуха позволяют сделать вывод о преимуществе последней: осушительно-испарительная система оказывает существенно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, чем традиционная по всем основным сравниваемым категориям. Альтернативная система ССКВ приводит к меньшему истощению природных ресурсов (на 25%, в т.ч. и энергоресурсов), что говорит о ее большей энергетической эффективности и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата (на 22%).

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ принципиальных возможностей разработанных ССКВ, показавший, что даже для очень тяжелых параметров наружного воздуха, разработанная ССКВ однозначно обеспечивает получение требуемых комфортных параметров воздушной среды в обслуживаемом помещении без привлечения традиционной парокомпрессионной техники; число требуемых ступеней охлаждения [(ДБР↔АБР) – НИО] в охладителе ССКВ определяется степенью трудности решаемой задачи, и, например, для условий Украины и Европы в целом, можно обойтись одно- либо двухступенчатым вариантом ССКВ; достигнутый уровень охлаждения основного воздушного потока в НИО, $t_0 = 23,5^{\circ}\text{C}$, оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху ($t_M 28^{\circ}\text{C}$) и даже ниже его точки росы ($t_p 25^{\circ}\text{C}$);

2. Результаты анализа, приведенные для десяти разработанных вариантов СХС иллюстрируют их сравнительные возможности с точки зрения достигаемого уровня охлаждения; самый глубокий уровень обеспечивают двухступенчатые охладители, причем это определяется ростом концентрации абсорбента от ступени к ступени охлаждения; несомненный интерес представляет вариант схс с использованием части «продуктовой» воды от «продуктовой» градирни грдпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2; для европейских условий солнечные абсорбционные схс обеспечивают получение захлажденной воды на уровне $8-10^{\circ}\text{C}$, что позволяет обслуживать ряд пищевых технологий, не прибегая к парокомпрессионным охладителям; дальнейшее снижение температурного уровня охлаждения связано с переходом к трехступенчатым СХС, или с ростом концентрации абсорбента, что связано с увеличением энергозатрат и опасностью кристаллизации вблизи критической линии для абсорбента.

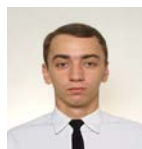
REFERENCES

- [1] Альтернативная энергетика. Солнечные системы теплоснабжения: монография /А. В.Дорошенко, М. А. Глауберман. - 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 энергетики. 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 I., McNab, Paul McGregor., 2003, 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, D.C, ICR0646.
- [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 2014, March 31 - April 2, 2014, Washington.
- [6] 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 2014, March 31 - April 2, 2014, Washington.
- [7] Chen G.M., Doroshenko A.V., Shestopalov K.O., Khliyeva O.Y. Evaporative coolers of water and air for cooling systems. Analysis and perspectives, the 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, August 31-September 2, 2014, Hangzhou.
- [8] Guangming Chen, Alexander Doroshenko, Paul Koltun, Kostyantyn Shestopalov, Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors, Solar Energy, 115, pp. 577-588, 2015.
- [9] Guangming Chen, Kostyantyn Shestopalov, Alexander Doroshenko, Paul Koltun, Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects, Polymer-Plastics Technology and Engineering, 54, pp. 796-805, 2015
- [10] Denis Pandelidis, Sergey Anisimov, William M. Worec. Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications. Intern. Journal of Heat and Mass Transfer 81 (2015) 207-221
- [11] Koltun, P. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternative Air-Conditioning Systems. P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0140, 2003. P. 45-57.
- [12] Дорошенко А.В. Солнечные многоступенчатые абсорбционные холодильные системы на основе тепломассообменных аппаратов пленочного типа // А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, К.В. Людницкий/. Холодильная техника и технология. – 2015. – 51(2) – С. 25-31
- [13] Дорошенко А.В., Людницкий К.В. Солнечные холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением. // Холодильная техника и технология. – 51 (3) – 2015. – С. 42-52.



Дорошенко Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, тепломассообмен, холодильная техника, альтернативная энергетика.



Людницкий Константин – аспирант кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, холодильная техника, альтернативная энергетика.



Антонова Альфия Раисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, тепломассообмен, математическое, компьютерное моделирование, холодильная техника, альтернативная энергетика.