

New Solutions for Solar Absorption Refrigeration Systems and Air Conditioning Systems

Doroshenko A.V., Antonova A.R., Liudnicky K.V., Ivanova L.V.

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

Abstract. The mission of the research includes the following objectives: the development of new circuit decisions for the alternate refrigerating systems based on the use of an open absorptive circuit and on the use of solar energy for absorbent solution regeneration; an assessment of the energy and environmental characteristics of the developed systems; obtaining of the experimental data for an assessment of the principal capabilities of the proposed new solar air-conditioning systems. The multistage principle of the creation of drying and cooling contours with the increase of concentration of absorbent on cooler steps is offered. The absorber with internal steam cooling allowing the improvement of the scheme of the alternate refrigerating system is developed. On the basis of the obtained experimental data the analysis of the main opportunities of the developed solar air-conditioning systems was made which showed that the created systems: provide the required comfortable parameters indoors without engaging of traditional refrigerating technics; allow to use only one - or two-stage option of refrigerating system for application in the conditions of Ukraine and of Europe. In comparison with traditional vapor-compression systems, the developed solar systems provide the considerable decrease in energy consumption (to 30%), their use leads to the decrease of exhaustion of natural resources, influences less global climate change.

Keywords: solar systems, drying of air, heat-mass-transfer apparatus, film flow, absorption, desorption, evaporative cooling.

Ultimele elaborări ale sistemelor solare de absorbție de refrigerare și de aer condiționat Capacitățile de dezvoltare și analiză

Doroșenco A.V., Antonova A.R., Liudnițchi C.V., Ivanova L.V.

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

Rezumat. Scopul investigației: dezvoltarea de circuite alternative pentru sistemele de refrigerare bazate pe utilizarea ciclului deschis și absorbției energiei solare pentru regenerarea soluției absorbante, evaluarea caracteristicilor energetice și de mediu ale sistemelor dezvoltate, obținerea date experimentale pentru estimarea caracteristicilor energetice și de mediu ale sistemelor solare. S-a propus un principiu cu mai multe etape de uscare și răcire în circuitele sistemelor solare de refrigerare cu creșterea concentrației soluției absorbante în circuitele răcitorului. S-a elaborat un nou absorbant pentru răcirea prin evaporare interioară, care permite de a îmbunătăți schema sistemului alternativ de refrigerare. Pe baza rezultatelor experimentale s-a realizat analiza posibilităților principiale ale sistemelor solare elaborate, care au arătat că sistemul solar furnizează parametrii de confort necesari într-o cameră fără a utiliza echipamentele de refrigerare tradiționale, concomitent se indică că pentru condițiile din Europa este suficientă doar una sau două etape de realizare a proceselor în sistemul de refrigerare. În comparare cu sistemele tradiționale, sistemele solare concepute oferă o reducere semnificativă a costurilor de energie (până la 30%), utilizarea lor conduce la reducerea epuizării resurselor naturale și să contribuie la diminuarea impactului asupra schimbărilor climatice la nivel global.

Cuvinte-cheie: sisteme solare, dezumidificare, sistem de transfer de masă termică, absorbție, desorbție, răcire prin evaporare.

Последние разработки солнечных абсорбционных холодильных систем и систем кондиционирования воздуха

Дорошенко А.В., Антонова А.Р., Людницкий К.В., Иванова Л.В.

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

Аннотация. Целями исследования были: разработка новых схемных решений для альтернативных холодильных систем, основанных на использовании открытого абсорбционного цикла и солнечной энергии для регенерации раствора абсорбента, оценка энергетических и экологических характеристик разработанных систем, получение экспериментальных данных для оценки принципиальных возможностей, предложенных новых солнечных систем кондиционирования воздуха. Предложен многоступенчатый принцип построения осушительного и охладительного контуров с возрастанием

концентрации абсорбента по ступеням охладителя. Разработан абсорбер с внутренним испарительным охлаждением, позволяющий усовершенствовать схему альтернативной холодильной системы. На основе полученных экспериментальных данных выполнен анализ принципиальных возможностей разработанных солнечных систем кондиционирования воздуха, который показал, что созданные системы: обеспечивают получение требуемых комфортных параметров в помещении без привлечения традиционной холодильной техники; позволяют использовать только одно- либо двухступенчатым вариантом холодильной системы для условий Украины и Европы. В сравнении с традиционными парокомпрессионными системами, разработанные солнечные системы обеспечивают значительное снижение энергозатрат (до 30%), их использование приводит к уменьшению истощения природных ресурсов, меньше влияет на глобальное изменение климата.

Ключевые слова: солнечные системы, осушение воздуха, тепло-массообменная аппаратура, пленочные течения, абсорбция, десорбция, испарительное охлаждение.

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)
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 жидкостной 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 _м , t _ж , h	температура воздуха по сухому и мокрому термометрам, (dry- and wet-bulb air temperature), температура воды (water film temperature), энтальпия (enthalpy)
d _э (d _ε)	эквивалентный диаметр канала насадки
x, г/кг	влажность (air humidity)
ОС	осушенный воздух (dried airstream)
НВ	наружный воздух (outdoor airstream)
ВВ	выбрасываемый в среду воздух (exhaust airstream)

ВВЕДЕНИЕ

Методы испарительного охлаждения (ИО) хорошо известны [1-13]. Этот процесс отличается малым потреблением энергии на его реализацию и сравнительной экологической чистотой применения. Практическое применение методов ИО сдерживается низкой эффективностью процесса при сравнительно высоких влажностях наружного воздуха. В

работах [2-3, Doroshenko A.V., Glauberman M.A., 2012. Alternative Energy. Refrigerating and Heating Systems. /monograph/. Odessa: I.I. Mechnikov National University Press, 2012. – 450 pp] рассмотрены принципы построения осушительно-испарительных охладителей, основанных на использовании открытого абсорбционного цикла. На основании ранее выполненных исследований авторами был выбран, в качестве основного решения, абсорбционный тип осушительно-

испарительной системы с непрямой регенерацией абсорбента.

I. ПОСТАНОВКА НОВЫХ РЕШЕНИЙ (СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ И АППАРАТУРЫ)

Суть открытого абсорбционного цикла заключается в том, что наружный воздух предварительно осушается, так что при этом резко возрастают потенциалы последующего испарительного охлаждения с использованием осушенного в абсорбере (АБР) воздуха, который затем поступает в ИО, где может быть обеспечено глубокое охлаждение среды в солнечных холодильных системах (СХС), либо в системах кондиционирования воздуха (ССКВ). При этом процесс испарительного охлаждения может быть эффективен безотносительно параметров наружного воздуха (относительной влажности и влагосодержания). Сравнительно с традиционными решениями, с применением парокомпрессионных охладителей сред, такие схемы обеспечивают значительное снижение энергопотребления и высокую экологическую чистоту [1-3, 6, 14]. Поддержание непрерывности осушительно-испарительного цикла обеспечивается солнечной регенерацией абсорбента в десорбере-регенераторе (ДБР). Перспективность практического использования альтернативных солнечных систем определяется их следующими достоинствами: - экологическая чистота; в работах [15], на основании методологии «Полный жизненный цикл», были показаны высокие экологические преимущества осушительно-испарительных охладителей в сравнении с традиционными парокомпрессионными охладителями; - сравнительно низкие энергозатраты по сравнению с парокомпрессионными охладителями (по данным зарубежных исследований [4-13] и в работах, выполненных в ОГАХ [1-3]); - возможность комплексного решения ряда задач жизнеобеспечения: горячего водоснабжения, отопления, охлаждения и кондиционирования (в частности, осушения воздуха) для жилых и производственных объектов, используя единую солнечную систему. Однако этим системам присущи и серьезные недостатки, сдерживающие их практическое развитие: - большие габариты, обусловленные низкими движущими силами (температурными и концентрационными напорами); большое количество ТМА, входящих в состав систем, что требует значительных энергозатрат на организацию движения теплоносителей

(работа воздушных вентиляторов и жидкостных насосов) и повышает стоимость оборудования; проблематичность использования только солнечной энергии для регенерации абсорбента. Основными направлениями для разрабатываемых солнечных систем являются: разработка и сравнительная оценка различных схемных решений осушительно-испарительных систем, в частности, использование многоступенчатых решений, обеспечивающих дальнейшее снижение достигаемого температурного уровня охлаждения сред; создание нового поколения ТМА для альтернативных систем, характеризующегося малым весом и стоимостью с преимущественным использованием полимерных материалов – полимерного солнечного жидкостного коллектора СКж [2, 3] и основных теплообменных аппаратов ТМА (абсорбер-осушитель АБР, десорбер-регенератор ДБР, испарительные охладители).

Основная концепция создания многофункциональных солнечных систем представлена на рис. 1-2 и включает следующие позиции: системы основаны на теплоиспользующем абсорбционном цикле открытого типа и состоят из осушительной части в составе абсорбер-осушитель – десорбер-регенератор (АБР – ДБР) и охладительной части, в составе испарительных охладителей газов и жидкостей прямого (водоохладитель-градирня ГРД), или непрямого (НИО, НИО-Р) типов; оптимальным для устойчивой работы систем является рациональное, с учетом величины солнечной активности, сочетание альтернативного и традиционного источников энергии; в солнечной системе используются плоские полимерные солнечные коллекторы [1-3]; охлаждение абсорбера-осушителя обеспечивает градирня технологического назначения; поддержание требуемого температурного уровня десорбции водяных паров из раствора абсорбента (восстановление концентрации абсорбента) обеспечивает солнечная система ССГВ.

На рис. 1-2 представлены основные элементы осушительного и охладительного контуров (обозначения: 1, 3 – абсорбер-осушитель наружного воздуха АБР; 2, 4 – испарительный воздухоохладитель НИО; 5, 6 – десорбер-регенератор; 7 – градирня технологического назначения ГРДт, продуктовая градирня в СХС; 8 – солнечная система, обеспечивающая регенерацию

абсорбента (СКж); 9 -12 – теплообменники; 13 – дополнительный греющий источник; 14 – распределители жидкости в аппаратах; 15 – сепаратор капельной влаги; 16 – вентилятор; 17 – обслуживаемый объект в СХС; НВ (П) – наружный воздух; ОВ – осушенный воздух; О и В – «основной» и «вспомогательный» воздушные потоки в НИО; N, М – крепкий и слабый растворы абсорбента). Основная формула сборки солнечных систем представляет собой варианты: в режиме ССГВ: (ДБР ↔ АБР) – НИО; в режиме СХС: (ДБР ↔ АБР) – ГРД. Холодные вспомогательные воздушные потоки, покидающие НИО в ССКВ, или ГРД в СХС могут использоваться для решения различных задач охлаждения в схеме, например, для предварительного охлаждения поступающего в абсорбер наружного воздуха, либо для охлаждения крепкого раствора абсорбента, поступающего в абсорбер.

Все тепломасообменные аппараты (ТМА) обоих контуров унифицированы. Это аппараты пленочного типа, основанные на использовании в качестве насадки многоканальных полимерных моноблоковых структур. Выбор структуры насадки, конфигурации каналов и структуры поверхности основан на ранее выполненных авторами исследованиях [1-3]. Работа десорбера обеспечивается солнечной системой горячего водоснабжения ССГВ, состоящей из системы солнечных жидкостных коллекторов СКж и бака-теплоаккумулятора БТА; работа абсорбера (охлаждение, поскольку при поглощении из воздушного потока водяных паров выделяется тепло, разогревающее абсорбер и снижающее эффективность реализуемого процесса) обеспечивается градирней технологического назначения ГРДг. Десорбер ДБР может выполняться многоступенчатым, с последовательным прохождением абсорбента (растворы бромистого лития LiBr, с добавками, снижающими коррозионную активность и увеличивающими растворимость) через каждую ступень регенерации; при этом соответствующие ступени солнечной системы десорбер-абсорбер связаны между собою (рис. 1), так что концентрация абсорбента повышается от ступени к ступени. В испарительном воздухоохладителе непрямого типа НИО (рис. 1А), получившем наибольшее распространение в последние годы [1-10],

воздушный поток, поступающий на охлаждение делится на две части. Вспомогательный поток воздуха (В) поступает в «мокрую» часть охладителя, где контактирует с водяной пленкой, стекающей по поверхностям канала и обеспечивает испарительное охлаждение воды, которая, в свою очередь, охлаждает бесконтактно, через разделяющую стенку, основной воздушный поток (О). Этот поток воздуха охлаждается при неизменном влагосодержании, что обеспечивает преимущества при создании на основе НИО систем кондиционирования воздуха ССКВ. Вспомогательный воздушный поток «В» выносит все тепло из аппарата в «связанном» виде, его температура также понижается и влагосодержание возрастает. Температура воды в цикле сохраняет неизменное значение и оказывается несколько выше температуры мокрого термометра поступающего в НИО воздуха, осушенного в соответствующей ступени абсорбера. Эта температура зависит от соотношения воздушных потоков в НИО и является пределом охлаждения для обоих воздушных потоков. Испарительные воздухоохладители могут быть обычного (НИО) и регенеративного типов (НИО-R) [1-3, 11-13], отличаясь местом разделения воздушного потока, поступающего в охладитель. Во втором случае обеспечивается более глубокое охлаждение воздуха, поскольку здесь процесс испарительного охлаждения воды ориентирован на температуру мокрого термометра воздуха, уже прошедшего охлаждение в «сухой» части охладителя и пределом охлаждения здесь, в принципе, является температура точки росы наружного воздуха. обстоятельному изучению возможностей охладителя регенеративного типа НИО-R посвящены исследования Maisotsenko V. и др. [11-13]. В качестве испарительного воздухоохладителя в схеме СХС может использоваться градирня ГРД (рис. 1Б и В), что обеспечивает получение «захоленной» воды и может служить основой для создания как альтернативных холодильных систем СХС, так и систем кондиционирования воздуха ССКВ с подачей холодной воды в помещение на вентилируемые водо-воздушные теплообменники (fan-coil). Для СХС перспективным является схема с использованием части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного

абсорбера АБР2 (рис. 1В). Это позволяет исключить из схемы технологическую градирню, обслуживающую АБР низкотемпературной ступени. На рис. 2 приведена схема размещения солнечной системы на обслуживаемом объекте (А) и общий вид блока охлаждения ССКВ (Б).

II. АНАЛИЗ ПРИНЦИПИАЛЬНЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ НА СОВМЕЩЕННЫХ ДИАГРАММАХ (РАБОЧЕЕ ТЕЛО (АБСОРБЕНТ) – ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ)

Анализ принципиальных возможностей был выполнен на примере двухступенчатых ССКВ с одним (единым для двух степеней) десорбером, решенной по формуле: [(ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР1 ↔ АБР2) – НИО2 → «О»] (рис. 3А и Б) и ССКВ с двумя десорберами, решенная по формуле: [(ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НИО2 → «О»] (рис. 3В). Анализ рассмотрен на примере двухступенчатых ССКВ с одним (единым для двух степеней) десорбером (рис. 3А и Б). Начальные 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 выполненного в работе теоретического и экспериментального исследований, опираясь на зависимости эффективности процессов от определяющих параметров (расходы газа и жидкости в ТМА и начальные температуры и влагосодержания контактирующих потоков, а также концентрацию раствора абсорбента). Результаты анализа приведены на рис. 3А 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 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.

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). 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), 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 и смешиваются перед теплообменником. Двухступенчатая (двухкаскадная) ССКВ с двумя десорберами (рис. 3В). Оптимально использование двухступенчатого десорбера, когда каждая его ступень обеспечивает последующий рост концентрации абсорбента и связана в работе с соответствующей ступенью абсорбера. Получено (последовательно по ступеням ССКВ), рис. 3В:

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^* 32⁰С,
 x^{2*} 6,5 г/кг;

4*: НИО2 (основной поток воздуха):
 t^4 21,0⁰С; x^{2*} 6,5 г/кг;

5*: НИО2 (вспомогательный поток
 воздуха): t^5 20,0⁰С, ϕ 100%

Достигнут более глубокий уровень охлаждения, чем в случае схемы с одним десорбером, $t_0 = 21,0^0$ С. Видно, что для очень тяжелых параметров наружного воздуха разработанная ССКВ однозначно обеспечивает получение требуемых комфортных параметров воздушной среды в обслуживаемом помещении. Число требуемых ступеней охлаждения [(ДБР ↔ АБР) – НИО] в ССКВ определяется степенью трудности решаемой задачи, и, например, для условий Украины и Европы в целом, можно обойтись одноступенчатым вариантом ССКВ.

Анализ возможностей СХС рассмотрен на примере двухступенчатых СХС с одним десорбером (рис. 4) и СХС с двумя десорберами (рис. 5А). Для СХС с одним десорбером получено (последовательно по ступеням охлаждения):

1: НВ: $t^1_{\text{В}} 40^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 28^0\text{С}, t^1_{\text{Р}} 25^0\text{С}, x^1 20$
 г/кг; ГРД → $t^2_{\text{Ж}} 32,5^0\text{С};$

2: АБР1: $t^1_{\text{В}} 41^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 24,5\text{С}, x^1_{\text{В}} 13$ г/кг
 АБР → ГРД: → $t^2_{\text{Ж}} 28,5^0\text{С};$

3: НИО: $t^1_{\text{В}} 31^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 22^0\text{С}, x^1_{\text{В}} 13$ г/кг
 АБР → НИО → ГРД: → $t^2_{\text{Ж}} 26,5^0\text{С};$

4: ГРД: $t^1_{\text{В}} 31,8^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 17,5^0\text{С}, x^1_{\text{В}} 8,0$ г/кг
 АБР1 → НИО → АБР2 →
 ГРД: → $t^2_{\text{Ж}} 21,5^0\text{С}$

Результаты анализа приведены также на диаграмме р-Т, рис. 4Б (показано изменение состояния раствора абсорбента в абсорберах по ступеням охладителя (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), в теплообменнике (8**)-9 и 10-7) и десорбере-регенераторе (9-10, ДБР). СХС с двумя десорберами (рис. 5А). В поле Н-Т диаграммы приведен анализ работы СХС по ступеням охлаждения для двух уровней концентрации абсорбента (предельный уровень концентраций для LiBr++ составляет 70-75%),

– (ξ^1 60% и 67% на входе в ступени охлаждения):

1: НВ: $t^1_{\text{В}} 40^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 28^0\text{С}, t^1_{\text{Р}} 25^0\text{С},$
 $x^1 20$ г/кг; → $t^2_{\text{Ж}} 32,5^0\text{С};$

2: АБР1: $t^1_{\text{В}} 41^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 24^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 13$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 28,5^0\text{С};$

3: НИО: $t^1_{\text{В}} 30^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 21^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 13$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 26,5^0\text{С};$

4: ГРД: $t^1_{\text{В}} 31^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 15,5^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 6$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 19,0^0\text{С}$

– (ξ^1 69% и 75% на входе в ступени охлаждения, рис. 10А):

1: НВ: $t^1_{\text{В}} 40^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 28^0\text{С}, t^1_{\text{Р}} 25^0\text{С},$
 $x^1 20$ г/кг; → $t^2_{\text{Ж}} 32,5^0\text{С};$

2: АБР1: $t^1_{\text{В}} 41^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 21,5^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 10,5$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 25,5,0^0\text{С};$

3: НИО $t^1_{\text{В}} 30^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 18,5^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 10,5$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 22,5^0\text{С};$

4: ГРД: $t^1_{\text{В}} 31^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 9,0^0\text{С},$
 $x^1_{\text{В}} 1,5$ г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 13,0^0\text{С}$

Видно, как рост концентрации абсорбента снижает достигаемый уровень влагосодержания, и, соответственно, общий уровень охлаждения среды. Двухступенчатая СХС с двумя десорберами и использованием части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2 (рис. 5Б). Получено:

1: НВ: $t^1_{\text{В}} 40^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 28^0\text{С}, t^1_{\text{Р}} 25^0\text{С}, x^1 20$
 г/кг, → $t^2_{\text{Ж}} 32,5^0\text{С};$

2: АБР1: $t^1_{\text{В}} 41^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 24^0\text{С}, x^1_{\text{В}} 13$ г/кг,
 → $t^2_{\text{Ж}} 28,5^0\text{С};$

3: НИО1: $t^1_{\text{В}} 30^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 21^0\text{С}, x^1_{\text{В}} 13$ г/кг,
 → $t^2_{\text{Ж}} 26,5^0\text{С};$

4: ГРД: $t^1_{\text{В}} 31^0\text{С}, t^1_{\text{М}} 15,5^0\text{С}, x^1_{\text{В}} 4$ г/кг,
 → $t^2_{\text{Ж}} 15,0^0\text{С};$

Возможная степень осушения воздушного потока при различных конфигурациях солнечных систем СХС и ССКВ иллюстрируется графиками зависимости достигаемой степени осушения воздуха $\Delta x_{\text{в}}$ от определяющих параметров наружного воздуха: влагосодержания, температуры и концентрации абсорбента (рис. 6). Результаты анализа, приведенные на рис. 7Б для десяти вариантов разработанных СХС иллюстрируют их сравнительные возможности с точки зрения достигаемого уровня охлаждения. Самый глубокий уровень обеспечивают двухступенчатые охладители, причем уровень охлаждения 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 «захожденной» воды на уровне 8-10⁰С, что позволяет обслуживать ряд пищевых технологий, не прибегая к пароконпресссионным охладителям.

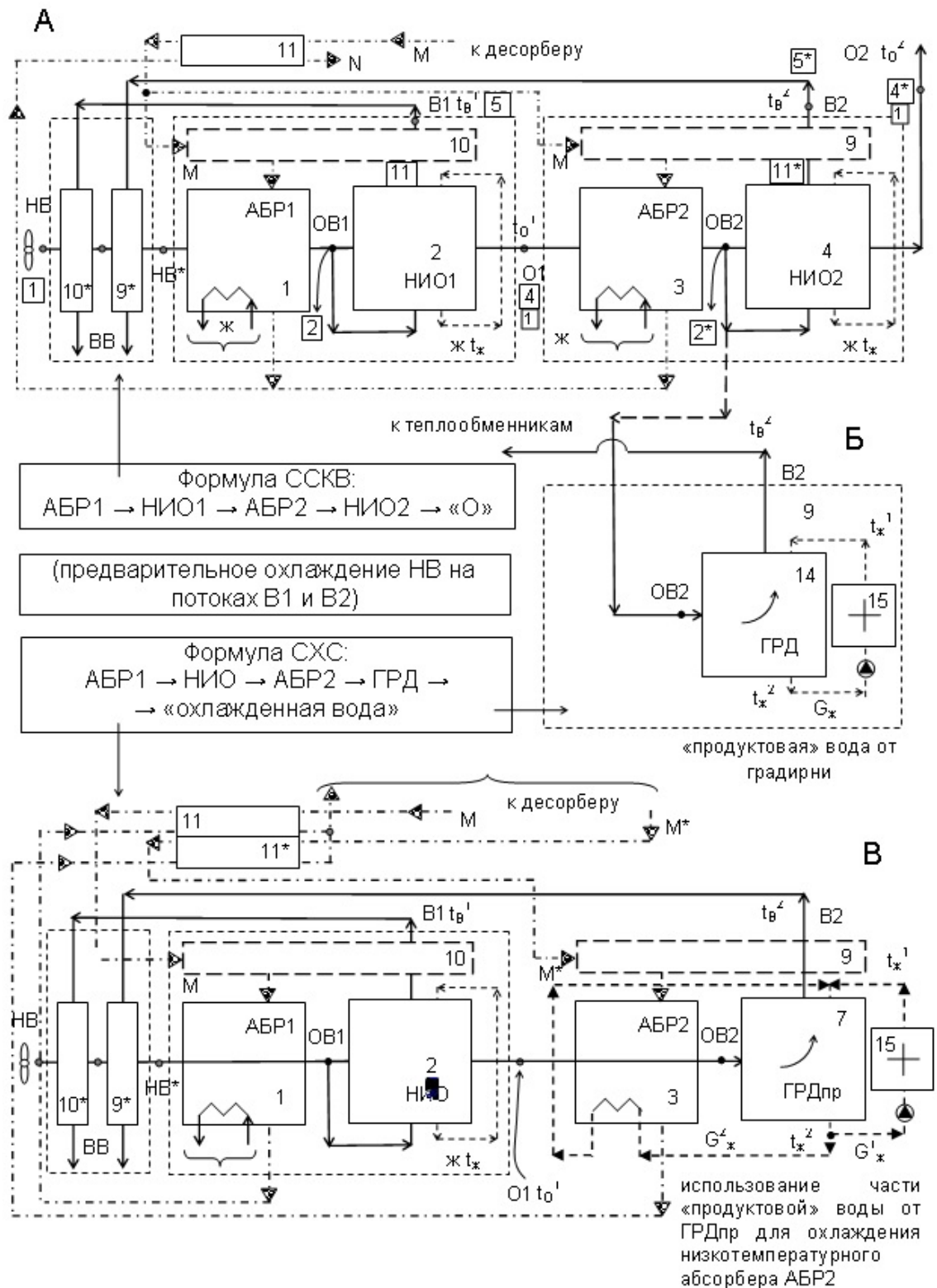


Рис. 1. Варианты разработанных схемных решений для ССКВ (А) и СХС (Б и В).

Обозначения приведены в тексте

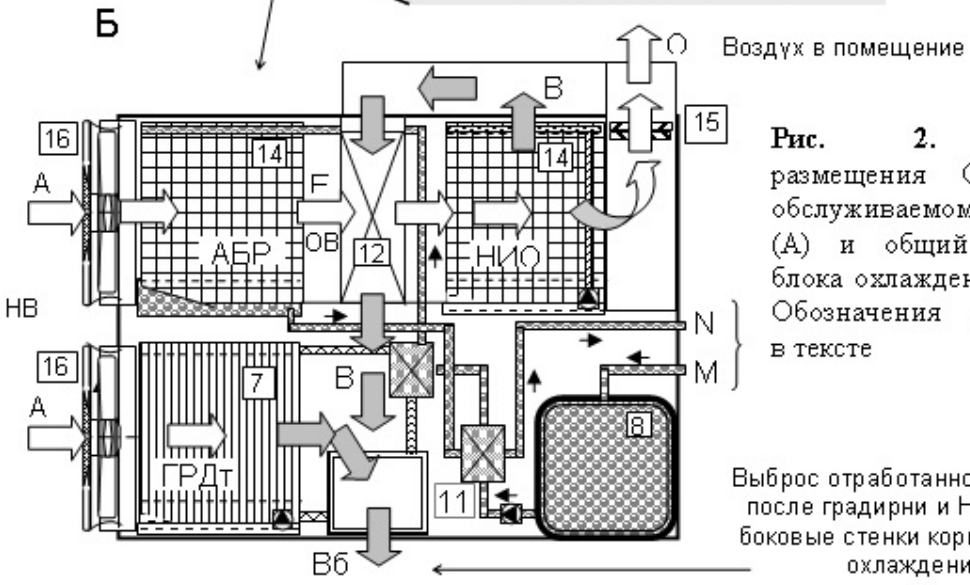
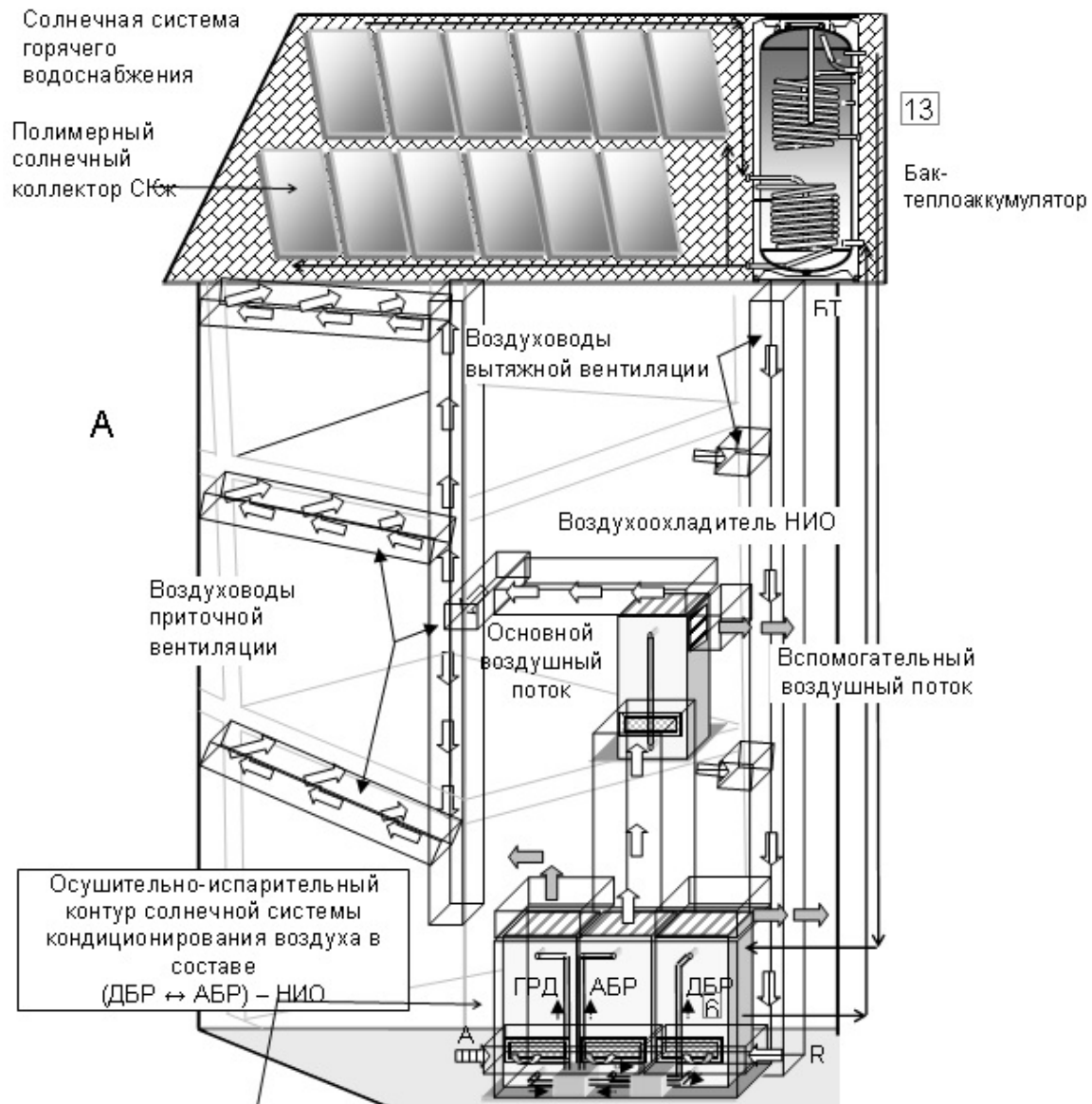


Рис. 2. Схема размещения ССКВ на обслуживаемом объекте (А) и общий вид (Б) блока охлаждения ССКВ. Обозначения приведены в тексте

Выброс отработанного воздуха после градирни и НИО через боковые стенки корпуса блока охлаждения

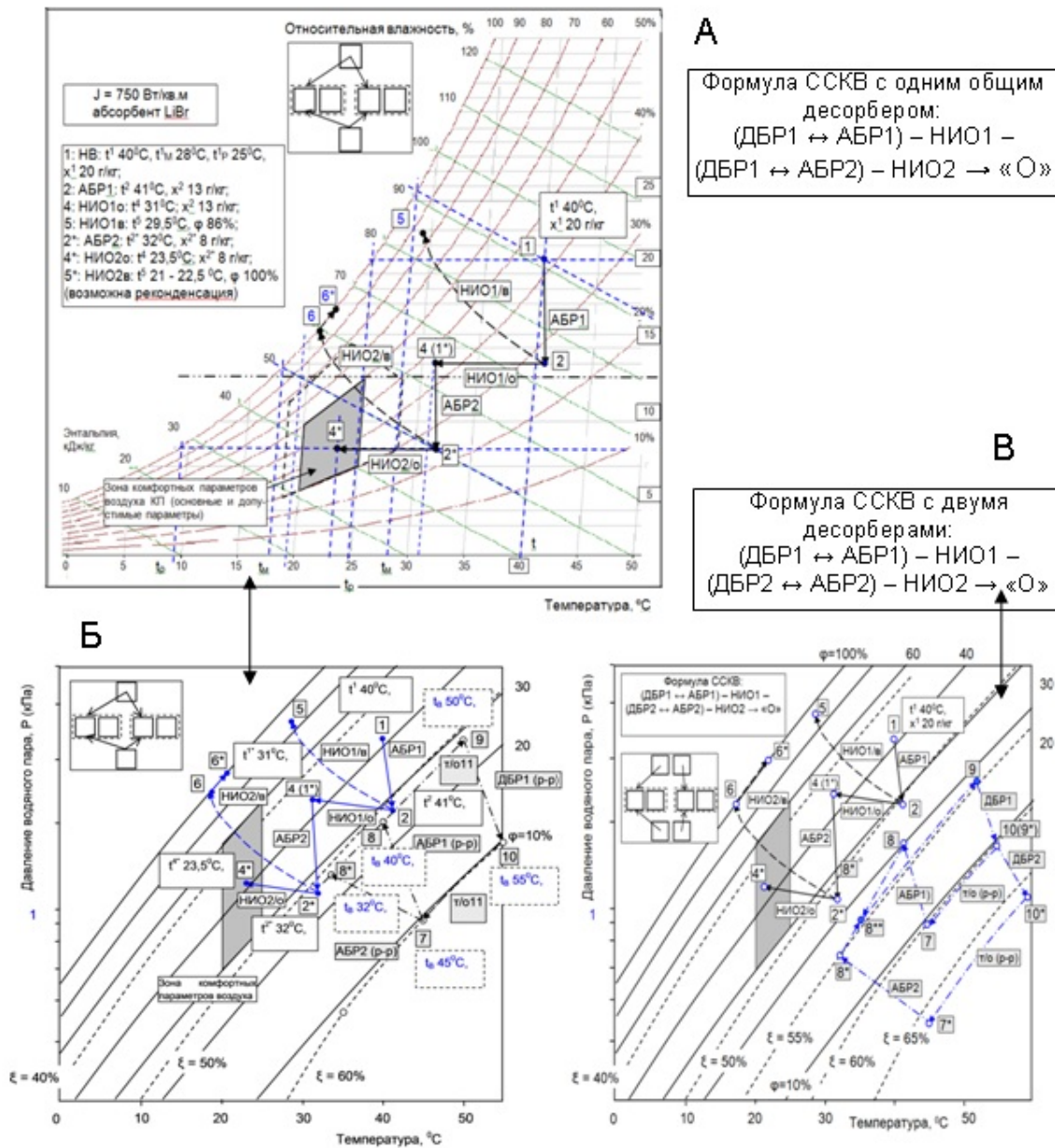


Рис. 3. Изображение процессов в ССКВ на h-T диаграмме вл. воздуха (А) и совмещенной диаграмме p-T для раствора LiBr+ – вл. воздух (Б) (формула [(ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР1 ↔ АБР2) – НИО2]). Показаны: 1-2 и 1*-2* – процессы осушения воздуха в АБР1 и АБР2; 2-4(1*) (основной возд. поток) и 2-5 (вспомогат. возд. поток) – НИО1; 2*-4* и 2*-6-6* – НИО2; 7-8(8*)-9-10 – изменение состояния раствора абсорбента в абсорбере (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), теплообменнике (8-9, 8*-9 и 10-7) и десорбере (9-10);

В – Процессы в двухступенчатой ССКВ по формуле [(ДБР1 ↔ АБР1) – НИО1 – (ДБР2 ↔ АБР2) – НИО2]. Показаны: 1-2 и (4)1*-2* – осушение воздуха в АБР1 и АБР2; 2-4(1*) (осн. возд. поток) и 2-5 (вспом. возд. поток) – процессы в НИО1; 2*-4* и 2*-6-6* – процессы в НИО2. Раствор абсорбента: 8**(7-8, 7*8*)-9-10-10* – процессы в абсорберах: (7-8-8**, АБР1) и (7*-8*-8**, АБР2), теплообменнике (8**-9 и 10-7, 10*-7*) и десорбере (9-10-10*).

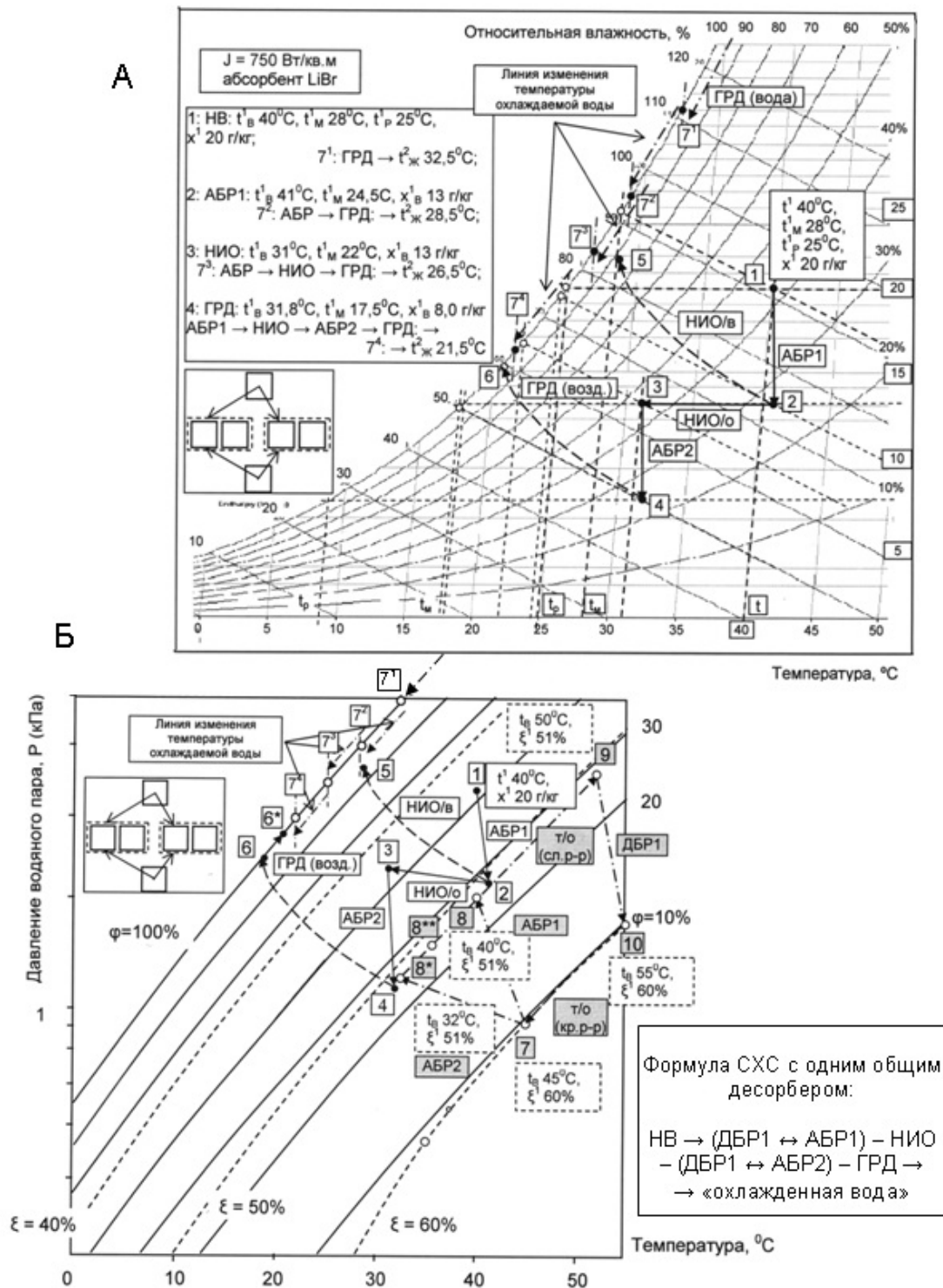
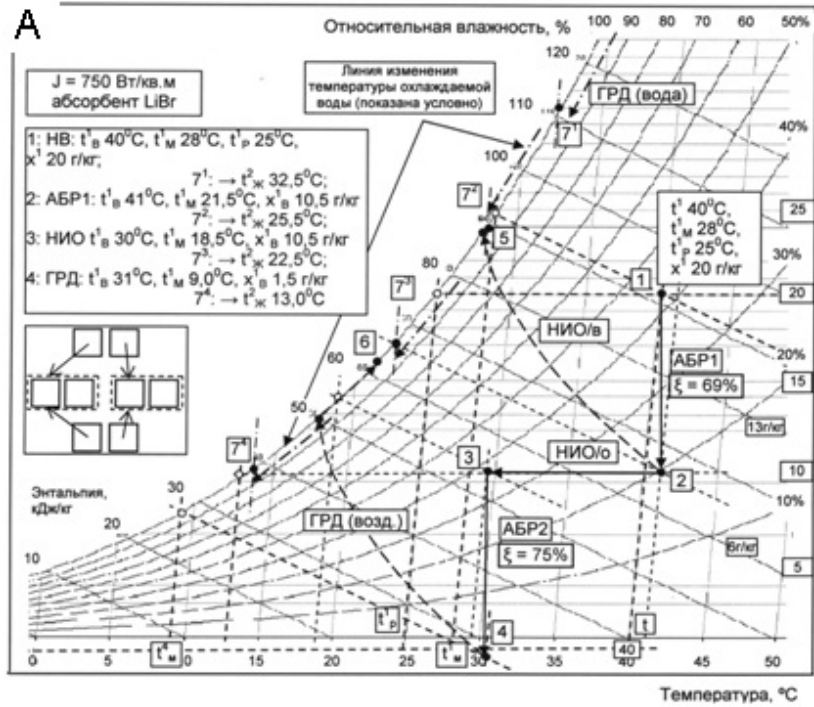
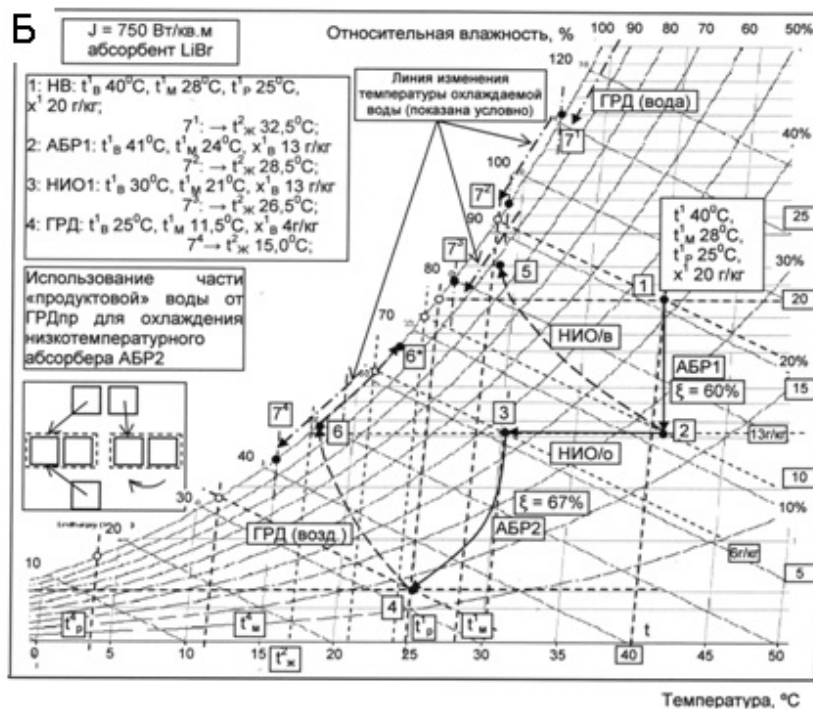


Рис. 4. Принципиальные возможности разработанных СХС (формула АБР1-НИО1-АБР2-ГРД). НВ: $t^1 40^\circ\text{C}$, $x^1 20 \text{ г/кг}$.

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)



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»

Рис. 5. Принципиальные возможности разработанных двухступенчатых СХС (Б-СХС с использованием части «продуктовой» воды для охлаждения низкотемпературного абсорбера второй ступени)

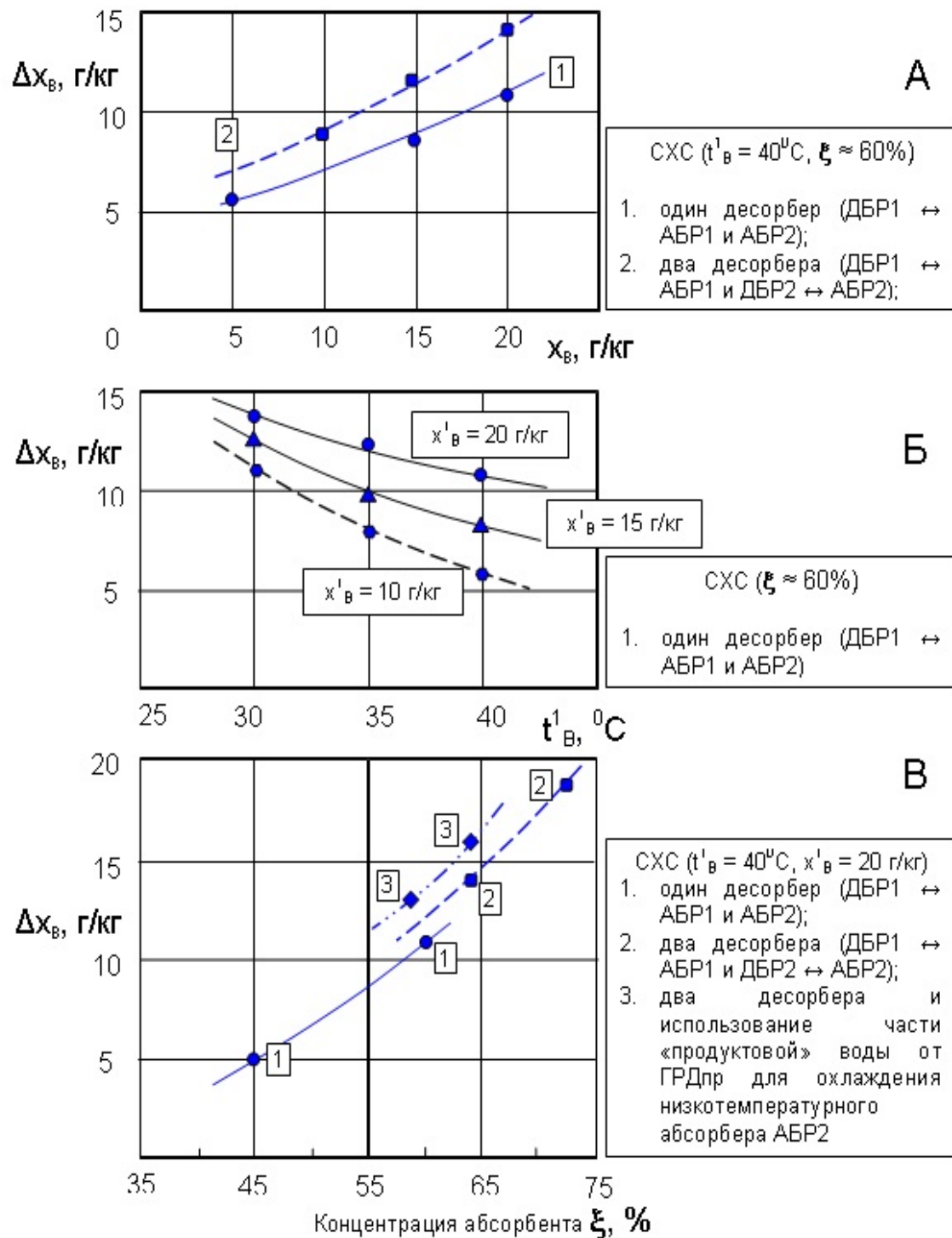


Рис. 6. Принципиальные возможности разработанных солнечных холодильных систем на основе открытого абсорбционного цикла с точки зрения достигаемого уровня осушения воздуха.

Влияние основных параметров работы системы, начальных параметров воздуха и концентрации абсорбента.

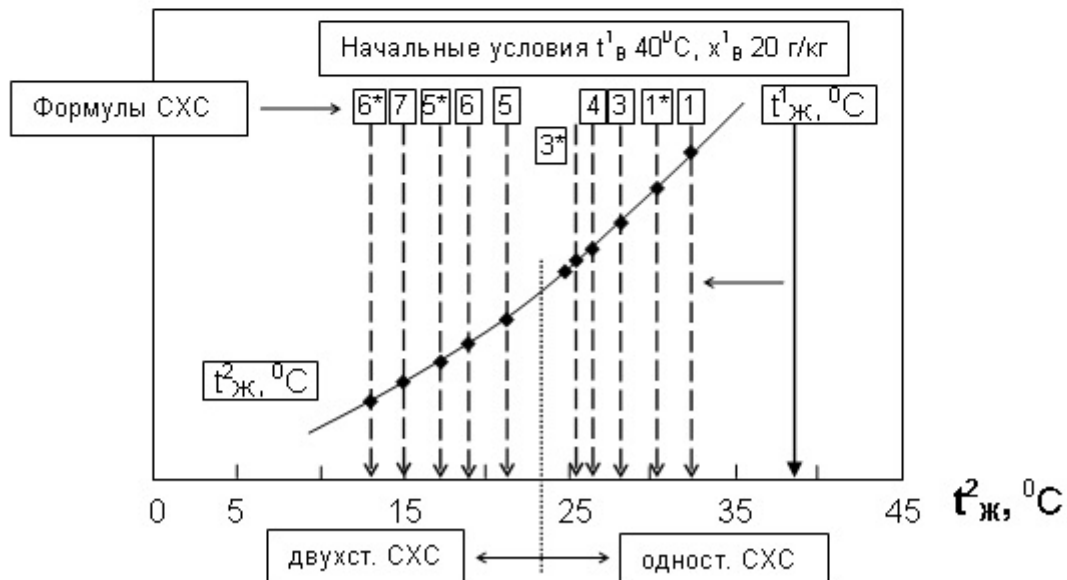
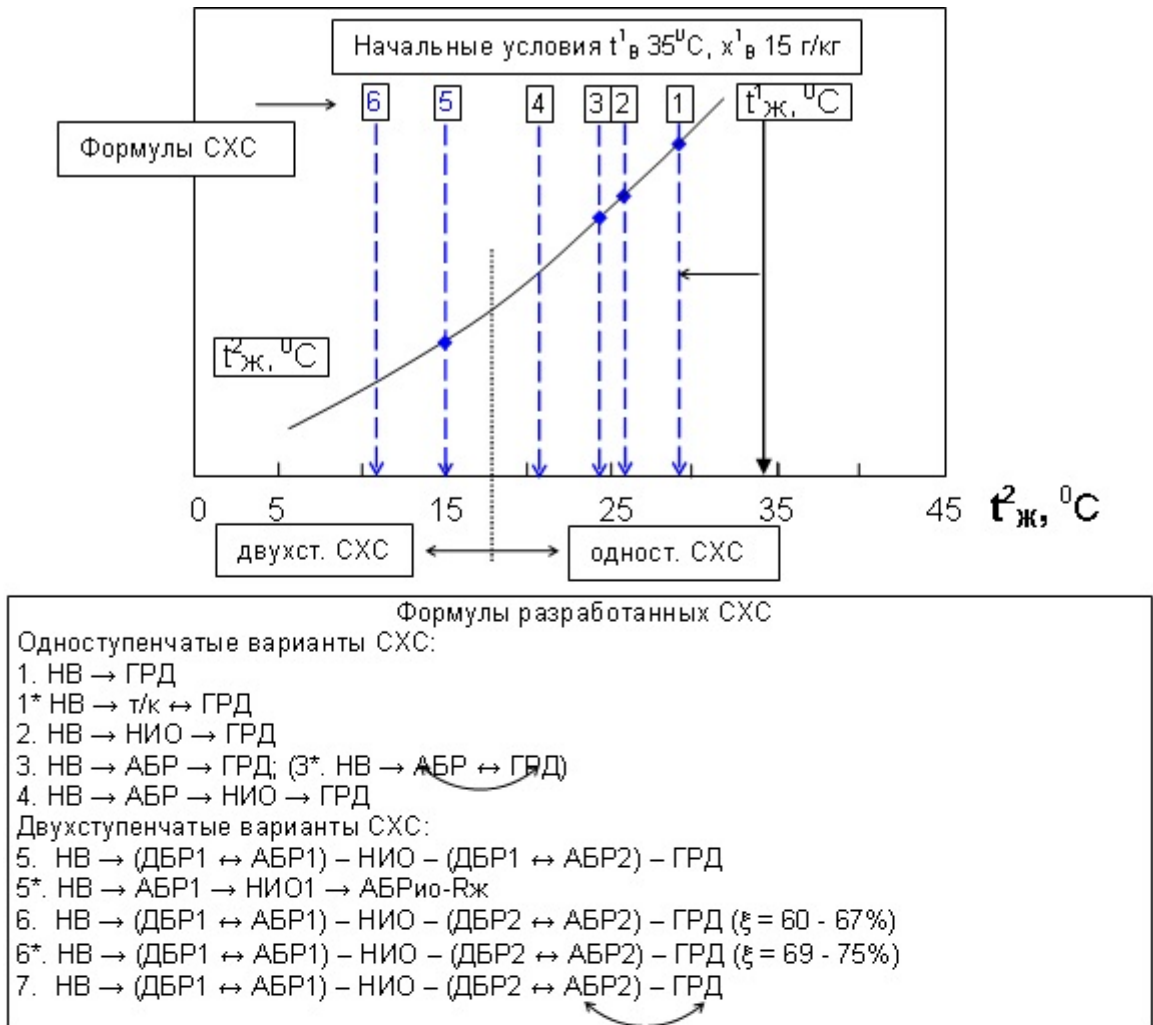


Рис. 7. Принципиальные возможности (уровень охлаждения) разработанных солнечных холодильных систем СХС на основе открытого абсорбционного цикла, основанных на различных формулах солнечной холодильной системы

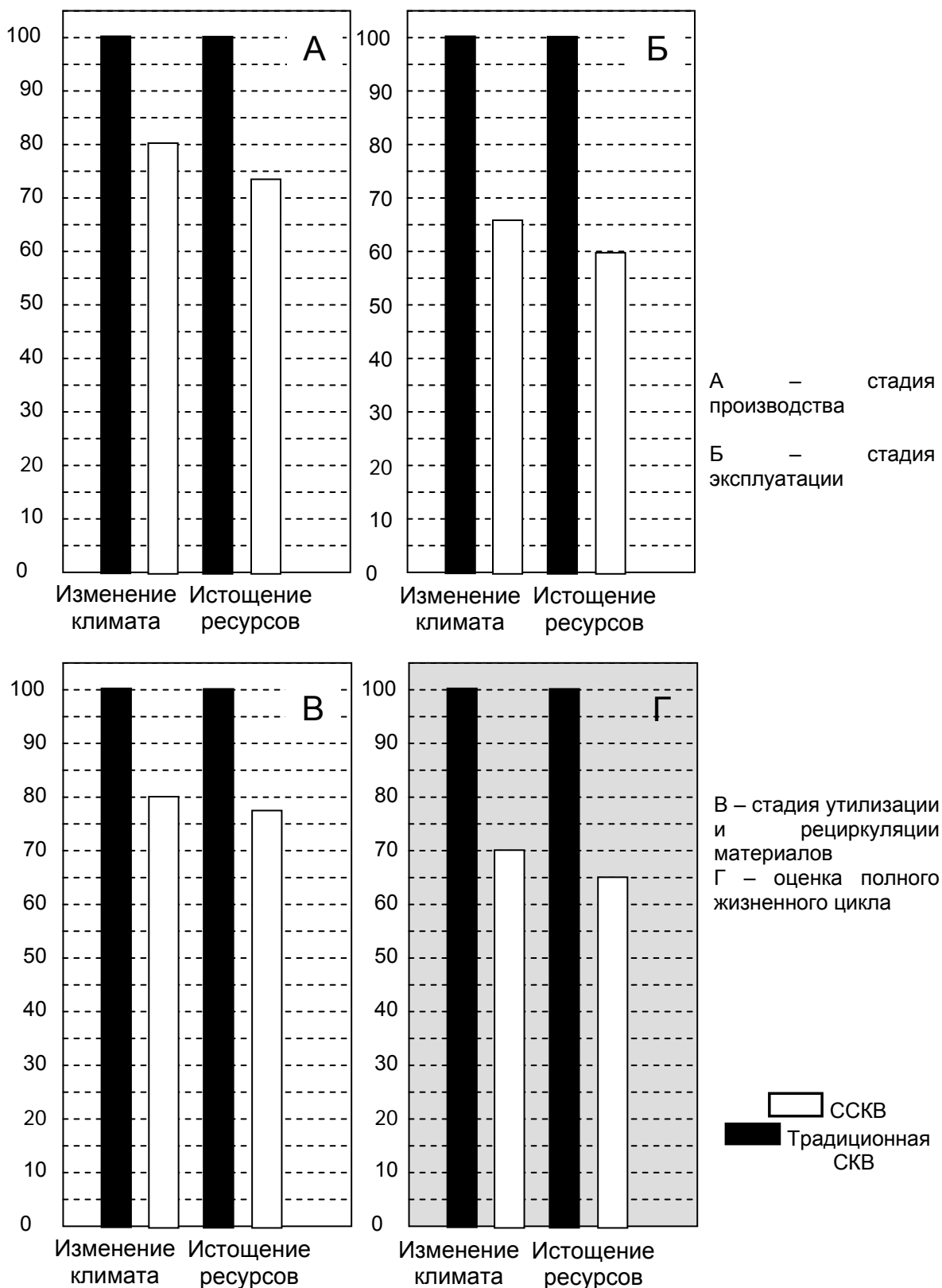


Рисунок 8. Сравнение экологического воздействия на стадии производства (А), в период эксплуатации (Б), на стадии утилизации (В) и в полном жизненном цикле сравниваемого оборудования (Г) для традиционной (парокомпрессионной) СКВ и осушительно-испарительной двухступенчатой ССКВ.

Дальнейшее снижение температурного уровня охлаждения связано с переходом к трехступенчатому СХС, или с ростом концентрации абсорбента, что связано с увеличением 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.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Выполнен общий экологический анализ новых решений СХС и ССКВ с использованием методологии и базы данных альтернативная система позволяет снизить энергозатраты примерно на 25 - 35 %, в зависимости от используемого схемного решения и начальных параметров

ВЫВОДЫ

1. Выполнен анализ принципиальных возможностей разработанных ССКВ, показавший, что даже для очень тяжелых параметров наружного воздуха, ССКВ однозначно обеспечивает получение требуемых комфортных параметров воздушной среды в обслуживаемом помещении без привлечения традиционной парокомпрессионной техники; число требуемых ступеней охлаждения 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 ($t_{\text{M}}^1 28^{\circ}\text{C}$) и даже ниже его точки росы ($t_{\text{P}}^1 25^{\circ}\text{C}$); переход к двухступенчатой ССКВ с двумя десорберами приводит к дальнейшему понижению уровня охлаждения ($t_0 = 21,0^{\circ}\text{C}$);

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 ис-

пользованием части «продуктовой» воды от «продуктовой» градирни ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2;

3. СХС при использовании части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР (при анализе варьировался относительный расход жидкости, идущей на охлаждение АБР, $l^* = G_{\text{ж}}^1 / G_{\text{ж}}^2$, при сохранении соотношения $l = G_{\text{г}} / G_{\text{ж}}^1 = 1,0$, которое для работы градирни является оптимальным) обеспечивает 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 трехступенчатому СХС, или с ростом концентрации абсорбента, что связано с увеличением энергозатрат и опасностью кристаллизации вблизи критической линии для абсорбента;

Литература (References)

- [1] Daffi J.A., Beckman Y.A, Heat processes with the use of solar energy, Moscow, Mir., 1977, 566 p.
- [2] Doroshenko A.V., Glauberman M.A. Alternative energy [Alternative energy]. *Refrigerating and Heating Systems*, [Odessa I.I. Mechnicow National University Press], 2012.
- [3] Guangming Chen, Alexander Doroshenko, Paul Koltun, Kostyantyn Shestopalov, Comparative field experimental investigations of different flat plate solar collectors, *Solar Energy*, 2015, vol. 115, pp. 577-588.
- [4] 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*, 2015, vol. 54, pp. 796-805.
- [5] Foster R.E., Dijkstra E. Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide. [Proc. Int. Conf. "Applications for Natural Refrigerants", Aarhus, Denmark, IIF/IIR, 1996, pp. 101-109 (In English).
- [6] Xie G., Wu Q., Fa X., Zhang L., Bans P. A novel lithium bromide absorption chiller with enhanced absorption pressure, *Applied Thermal Engineering*. 2012, vol. 38, pp. 1-6.
- [7] John L., McNab, Paul McGregor. Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger. . [Proc. 21 International Congress of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.

[8] Stoitchkov N. J., Dimirov G.J. Effectiveness of Crossflow Plate Heat Exchanger for Indirect Evaporative Cooling. *Int. J. Refrig.*, vol. 21, no. 6, 1998, pp. 463-471.

[9] Zhao, X., Liu, S., Riffat, S.B. Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems. [Proc 43th Int Conf. "Building and Environment"], 2008, pp. 1902–1911.

[10] Gomes E.V., Martinez F.J., Diez, F.V., Leyva, M.J., Martin, R.H., Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler. *Int. Journal of Refrigeration*, 2005, vol. 28, pp. 654-662.

[11] Martínez F.J., Gómez E.V., García C.M., Requena J.F., Gracia L.M., Navarro S.H., Guimaraes A.C., Gil J.M. Life cycle assessment of a semi-indirect ceramic evaporative cooler vs a heat pump in two climate areas of Spain. *Applied Energy*. 2011, vol. 88, pp. 914-921.

[12] Metod and Apparatus of Indirect-Evaporative Cooling, Patent RF, no. US 6,497,107 B2, 2002.

[13] Maisotsenko V., Leland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling. [Proc. 21^h Int. Cong of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.

[14] 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*, 2015, vol.81, pp. 207-221

[15] *GOST 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air* [State Standard 12.1.005-88. Occupational safety standards system. General sanitary requirements for working zone air]. Moscow, Standartinform Publ., 1989.

[16] ASHRAE Handbook of Fundamentals. /monograph/. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, GA, 2005, 189p.

[17] P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternative Air-Conditioning Systems. [Proc 21th International Congress of Refrigeration IIR/IIF], Washington, D.C, ICR0140, 2003, pp. 45-57.

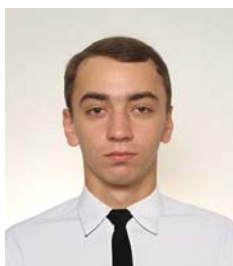
Сведения об авторах.



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, доцент кафедры информационных технологий и кибербезопасности ОНАПТ, сфера научных интересов – математическое моделирование, теплофизика, тепломассообмен, холодильная техника, альтернативная энергетика.
e-mail: allaantonova62@gmail.com



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



Иванова Лидия Владимировна – ассистент кафедры тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий Института энергетики и компьютерно - интегрированных систем управления ОНПУ, сфера научных интересов: тепломассообмен, альтернативная энергетика.