

## Development and Ecological-Energy Comparative Analysis of Vapor Compression and Solar Absorption Schemes of Air Conditioning Systems

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

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

**Abstract.** The mission of the research included 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. New principles for design of heat and mass transfer equipment in the version with a movable packing of heat exchange elements (fluidized bed packing "gas - liquid - solid body") placed in the packed bed were developed, which allows self-cleaning of the working surfaces and walls of the heat and mass transfer equipment HMT. This new solution, when working with outdoor air and solutions of absorbents, seems to be a fundamentally important condition for maintaining the working capacity of solar absorption systems. The new schemes of absorber with internal steam cooling allowing the improvement of the new scheme of the alternate refrigerating system were developed. Comparative analysis based on the methodology of the "Life Cycle Assessment" (LCA) showed that new, developed solar systems provide the considerable decrease in energy consumption, 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, fluidized bed packing, absorption, desorption, evaporative cooling.

### Elaborarea și analiză comparativă ecologică și energetică a schemelor de compresie de vapori și solare de absorbție ale sistemelor de climatizare

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

Institutul de Cercetări și de educație în domeniul tehnicii frigorifice, criotehnologie și Eco-Energeticii  
Odesa Academia Națională de Tehnologii Alimentare, Odesa, Ucraina

**Rezumat.** Scopul investigației: elaborarea de noi soluții de realizare pentru sistemele alternative de refrigerare bazate pe utilizarea ciclului deschis de absorbție și a energiei solare pentru regenerarea soluției absorbante, stimularea caracteristicilor energetice și de mediu ale sistemelor elaborate, obținerea de date experimentale pentru estimarea performanțelor posibile ale sistemelor solare propuse. S-au elaborat principii noi de realizare constructivă a echipamentelor cu amplasarea în patul aglomerat al duzei mobile a elementelor de schimb de căldură, care permite auto-curățarea suprafețelor de lucru și a pereților corpului TMA. Această soluție la utilizarea aerului exterior și a soluțiilor de absorbenți, prezintă condiție extrem de importantă pentru asigurarea robusteții sistemelor solare realizate cu componente absorbante. A fost elaborat un absorber cu răcire prin evaporare internă, ceea ce face posibilă îmbunătățirea designului unui sistem alternativ de răcire. În comparație cu sistemele tradiționale de compresie a vaporilor, sistemele solare elaborate oferă o reducere semnificativă a consumului de energie, utilizarea lor duce la o reducere a epuizării resurselor naturale și într-o măsură mai mică afectează schimbările climatice globale.

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

### Разработка и эколого-энергетический сравнительный анализ парокомпрессионных и солнечных абсорбционных схем систем кондиционирования воздуха

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

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

**Аннотация.** Целями исследования были: разработка новых схемных решений для альтернативных холодильных систем и систем кондиционирования воздуха, 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. Разработаны новые принципы оформления теплообменной аппаратуры в варианте с размещением в насадочном слое подвижной насадки теплообменных элементов, что обеспечивает возможность

самоочищения рабочих поверхностей и стенок корпуса ТМА. Это решение, при работе с наружным воздухом и растворами абсорбентов, представляется принципиально важным условием поддержания работоспособности солнечных абсорбционных систем. Разработан новый абсорбер с внутренним испарительным охлаждением, который позволяет усовершенствовать схему альтернативной холодильной системы. Сравнительный анализ, выполненный на основе методологии «Полный Жизненный цикл» («Life Cycle Assessment», LCA) показал, что новые, разработанные солнечные системы обеспечивают значительное снижение энергозатрат, их использование приводит к уменьшению истощения природных ресурсов и в меньшей степени влияет на глобальное изменение климата.

**Ключевые слова:** солнечные системы, осушение воздуха, тепло-массообменная аппаратура, псевдооживленная насадка, абсорбция, десорбция, испарительное охлаждение.

### СОКРАЩЕНИЯ

ОГАХ	Одесская государственная академия холода
ТМА	тепломассообменный аппарат
СХС	солнечная холодильная система
ССКВ	солнечная система кондиционирования воздуха
АБР (ABR)	абсорбер
ДБР (DBR)	десорбер
ГРД (GRD)	градирня
НИОг (IEC <sub>g</sub> )	испарительный воздухоохладитель непрямого типа
НИОж (IEC <sub>w</sub> )	испарительный водоохладитель непрямого типа
В и О	основной и вспомогательный воздушные потоки
ПН	подвижная (псевдооживленная) насадка «газ-жидкость-твердое тело»
М, N	крепкий и слабый раствор абсорбента
СКж (SC <sub>w</sub> )	солнечный жидкостной коллектор
Т/О	теплообменник
ж (l)	жидкость (вода, раствор абсорбента)
г (g)	газ-воздух
пл (fl)	жидкостная пленка
t, t <sub>м</sub> , t <sub>ж</sub> , h	температура воздуха по сухому и мокрому термометрам, температура воды, энтальпия
x, г/кг	влажностное содержание
ОС	осушенный воздух
НВ	наружный воздух
ВВ	выбрасываемый в среду воздух

### ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена созданию новых схемных решений солнечных многофункциональных систем тепло-хладоснабжения и кондиционирования воздуха (СХС и ССКВ) осушительно-испарительного типа с непрямой регенерацией абсорбента, разработке теплообменной аппаратуры (ТМА) для таких систем, выбору рабочего тела для осушительного контура системы и анализу принципиальных возможностей таких новых систем на основе выполненного цикла теоретических и экспериментальных исследований. [Doroshenko A.V., Glauberman M.A., 2012. Alternative Energy. Refrigerating and Heating Systems. /monograph/. Odessa: I.I. Mechnikov National University Press, 2012. – 450 pp]

### I. ОСНОВНЫЕ ИДЕИ РАБОТЫ

Аналитический обзор позволил выделить, в качестве перспективного направления разработок, следующие принципы: солнечные теплоиспользующие абсорбционные системы (открытый цикл) с непрямой регенерацией абсорбента; солнечные жидкостные коллекторы СКж, выполненные на основе полимерных материалов [1-3]; использование унифицированных ТМА с подвижной псевдооживленной насадкой ПН (в варианте с размещением в насадочном слое ПН теплообменных элементов, - ПНт-к) в осушительном и охладительном контурах солнечных систем.

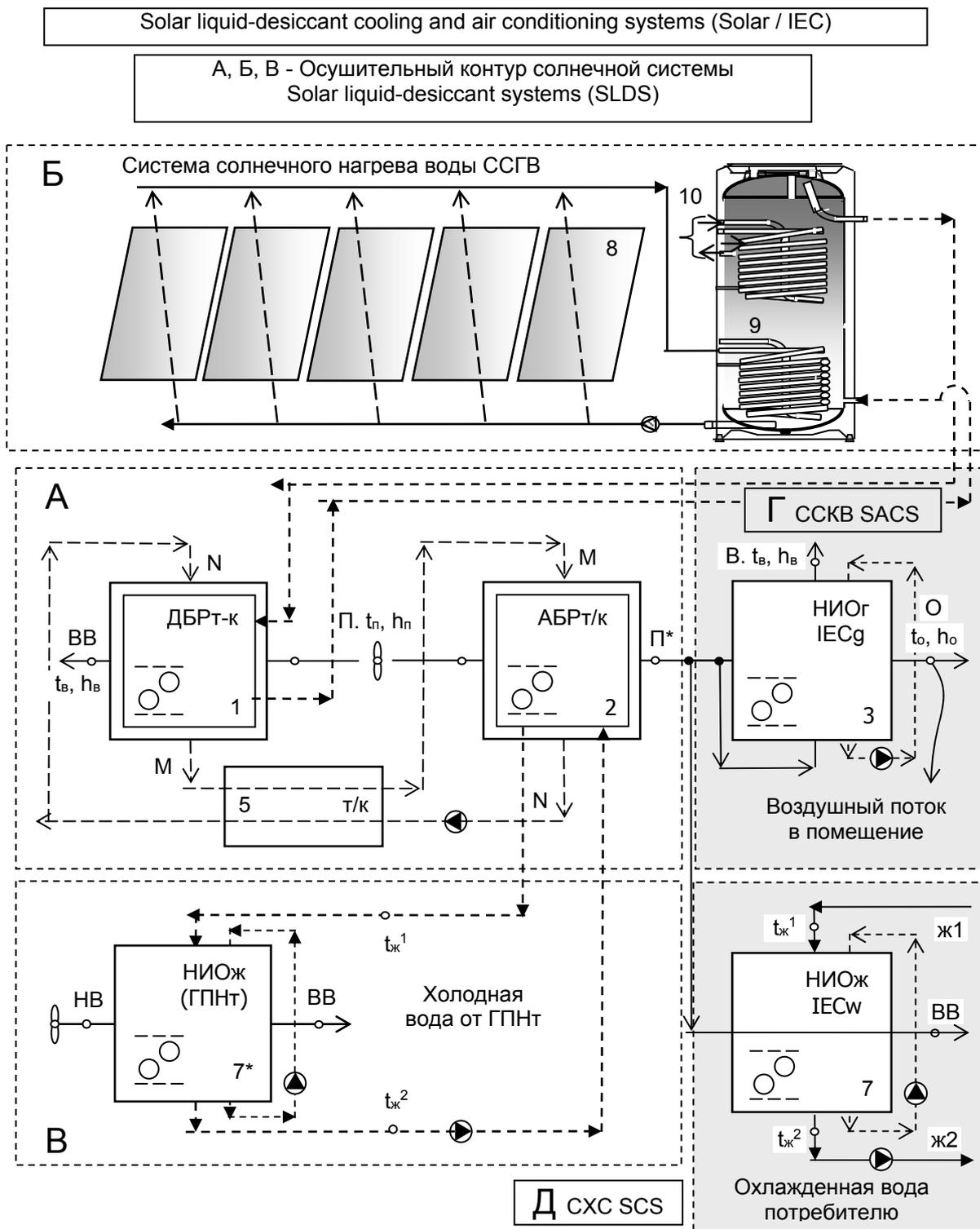
Солнечная холодильная система (рис. 1) включает два контура: осушения воздушного потока (А) и охладительный (Г и Д), в котором охлаждается вода (СХС), или происходит

термовлажностная обработка воздуха (ССКВ). Осушительный контур состоит из абсорбера-осушителя наружного воздуха (АБР), десорбера-регенератора (ДБР), причем абсорбер нуждается в охлаждении, поскольку в процессе поглощения водяных паров выделяется тепло, а десорбер в подводе тепла для регенерации абсорбента. Для этих целей впервые предусмотрен теплообменник, размещаемый непосредственно в объеме подвижной насадки ПНт-к. Задачу охлаждения решает испарительный водоохладитель (В), а задачу генерирования тепловой энергии солнечная система (Б), состоящая из набора солнечных коллекторов СКж (8) и бака-теплоаккумулятора (16). Охлаждающий контур включает испарительный охладитель непрямого типа, – воды НИОж, – либо НИОг, обеспечивающий подачу в помещение воздуха, прошедшего термовлажностную обработку. В настоящее время в практике получили распространение комбинированные решения, когда в помещение подается как обработанный воздух, так и охлажденная вода, что обеспечивает требуемую оперативность управления комфортными параметрами воздушной среды в помещении. В осушительной части тепло, необходимое для регенерации абсорбента, обеспечивается гелиосистемой с плоскими солнечными коллекторами СКж (9 – бак-теплоаккумулятор, 10 – дополнительный греющий источник, необходимость в котором определяется естественными колебаниями солнечной активности и изменяющимися рабочими параметрами солнечной системы). Воздушный поток (свежий наружный воздух) при осушении в абсорбере АБР снижает влагосодержание  $x_2$ , что обеспечивает значительный потенциал последующего испарительного охлаждения воды в НИОж или воздуха в НИОг.

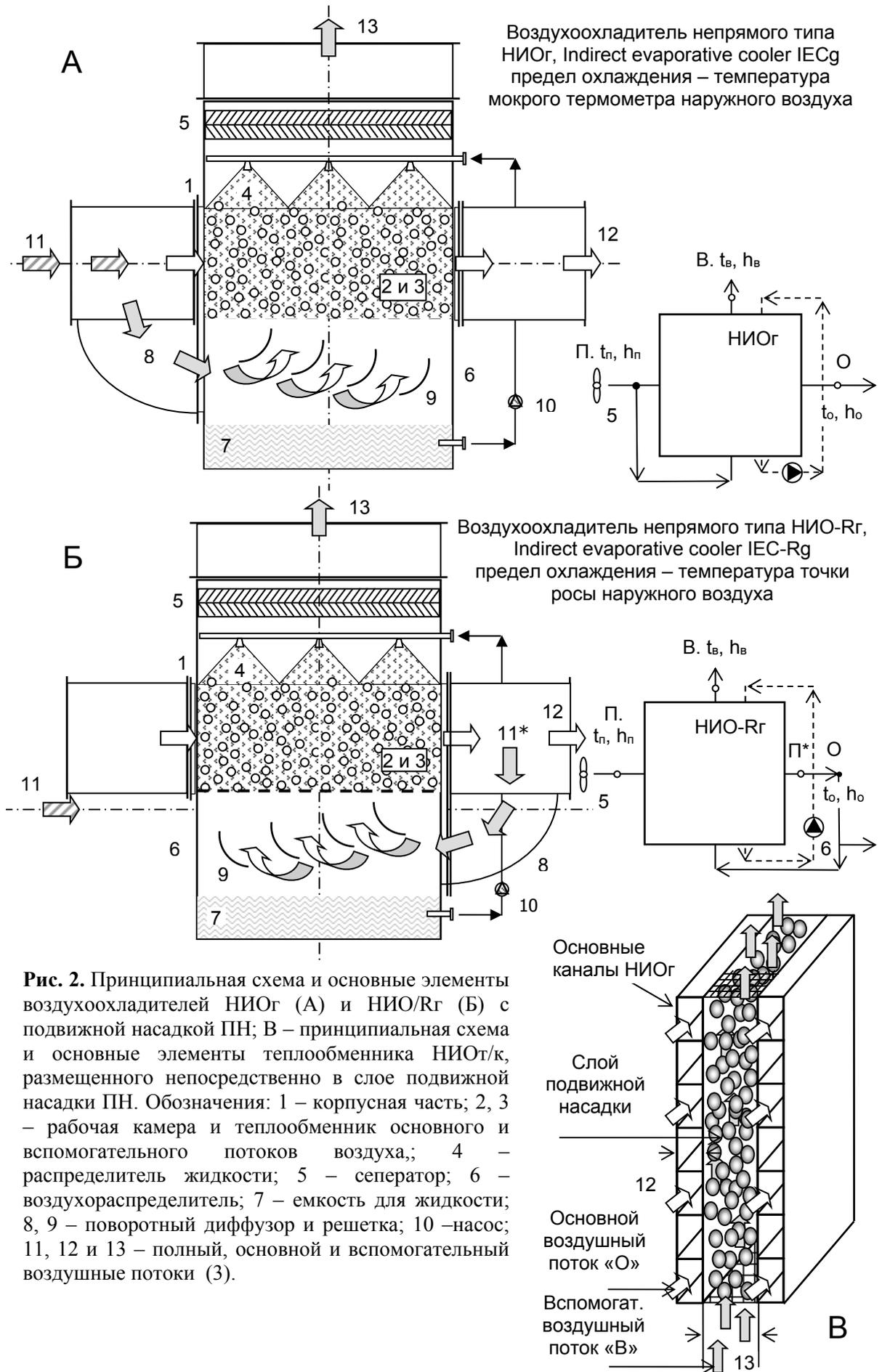
В качестве ТМА используются разработанные аппараты унифицированного типа с подвижной насадкой сферической формы (трехфазный псевдооживленный слой «газ-жидкость-твердое тело») и размещенным в нем теплообменником (слой ПНт-к). Это обеспечивает возможность самоочистки рабочих поверхностей и стенок корпуса ТМА, что, при работе с наружным воздухом и растворами абсорбентов, представляется принципиально важным условием поддержания работоспособности систем.

## II. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОДВИЖНОЙ НАСАДКИ В ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТАХ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ

В ранее выполненных разработках на основе подвижного насадочного слоя ПН [1-4] использовали прямой (непосредственный) контакт взаимодействующих потоков газа и жидкости (воздуха в воздухоохладителе прямого типа ПИОг и водоохладителях-градирнях ГРД), что буквально соответствует определению трехфазной системы «газ-жидкость-твердое тело» (рис. 2). Традиционные аппараты с ПН (АПН) выполнены в виде колонны (рис. 2 и 3), рабочая зона которой ограничена опорно-распределительной решеткой (ОРР, выполненной как опорная решетка либо как теплообменник) и ограничительной решеткой-каплеуловителем (6). АПН – новое решение колонных ТМА, обеспечивающее возможность эксплуатации в экстремальных условиях (загрязненные среды, резкие колебания нагрузок), повышение предельных нагрузок, высокую поперечную равномерность (упрощение задачи масштабирования), нетребовательность к качеству первоначального распределения потоков, особенно жидкости. В качестве элементов насадки (ЭН) в аппаратах с ПН могут быть использованы тела различной формы, изготовленные из материалов, устойчивых в соответствующих средах. Для системы «вода-воздух» эти требования упрощаются [2-4]. ЭН должны обеспечивать хороший контакт газа и жидкости, высокую поверхность переноса в слое; хорошее качество псевдооживления; низкие потери напора; надежность и простоту эксплуатации. В экспериментальных работах и практике наиболее распространена сферическая форма ЭН: это пустотелые, цельные, либо выполненные из пористых материалов ЭН с различными отверстиями (рост поверхности контакта и перераспределение жидкости), выступами и т.д. Материалом ЭН служат пластмассы – полиэтилен, полипропилен, пенопласт, фторопласт, стирол; резина; металлы – полые ЭН.



**Рис. 1.** Принципиальная схема солнечной абсорбционной системы с воздухоохладителем НИОг (Г) и водоохладителем НИОж в охладительном контуре (формулы ДБР-АБР-НИОг и ДБР-АБР-НИОж). Обозначения: 1 – десорбер ДБР; 2 – абсорбер АБР; 3 и 4 – воздухоохладители НИОг и НИО-Рг; 5 – теплообменник крепкого горячего и слабого холодного растворов абсорбента; 6 – теплообменники; 7 – воздухоохладитель НИОж; 8 – солнечная система в составе жидкостных коллекторов СКЖ, бака-теплоаккумулятора (9) и дополнительного греющего источника (10). НВ – наружный воздух; П, О и В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки (НИОг); ВВ – выброс воздуха из ДБР и НИОж; М, N – крепкий и слабый растворы абсорбента.



**Рис. 2.** Принципиальная схема и основные элементы воздухоохладителей НИОг (А) и НИОг/Rг (Б) с подвижной насадкой ПН; В – принципиальная схема и основные элементы теплообменника НИОг/к, размещенного непосредственно в слое подвижной насадки ПН. Обозначения: 1 – корпусная часть; 2, 3 – рабочая камера и теплообменник основного и вспомогательного потоков воздуха; 4 – распределитель жидкости; 5 – сеператор; 6 – воздухораспределитель; 7 – емкость для жидкости; 8, 9 – поворотный диффузор и решетка; 10 –насос; 11, 12 и 13 – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки (3).

**Перспективы использования ПН в испарительных охладителях непрямого типа. Особенности конструирования НИО на основе подвижной насадки ПНт-к.** В мировой практике последних десятилетий широкое распространение при создании ТМА получил принцип непрямого контакта, выраженный в создании испарительных охладителей непрямого типа: воздухоохладителей НИОг и водоохладителей НИОж [3-5, 9-11, 12-13].

Применительно к воздухоохладителю НИОг (рис. 2) это заключается в том, что основной воздушный поток охлаждается бесконтактно с жидкостью, при неизменном влагосодержании, а вспомогательный находится в прямом контакте с рециркулирующей через «мокрую» часть аппарата водой, при этом температура воды остается неизменной, на несколько градусов превышая температуру входящего в аппарат воздуха по мокрому термометру  $t_m$ ; степень отклонения от  $t_m$  определяется величиной тепловой нагрузки со стороны охлаждаемого через разделительную стенку основного воздушного потока. НИОг обеспечивает «сухое» охлаждение продуктового воздушного потока, что позволяет получить воздух, охлажденный при неизменном влагосодержании (это принципиально важно для СКВ) и резко повышает потенциал его дальнейшего использования в испарительных охладителях (например, для солнечных холодильных систем СХС, при включении градирни ГРД непосредственно после НИОг)

Применительно к водоохладителю НИОж (рис. 3) это заключается в том, что «продуктовый» поток воды охлаждается бесконтактно с воздушным потоком, а испарительное охлаждение обеспечивается при прямом контакте воздушного потока и рециркулирующей через аппарат водой. НИОж обеспечивает бесконтактное охлаждение «продуктовой» воды, поступающей в дальнейшем в теплообменники (в случае ССКВ охлажденная вода после НИОж поступает в вентиляторные охладители воздуха).

В аппаратах осушительного контура, в десорберах регенераторах ДБР и абсорберах-осушителях воздуха АБР (рис. 3), где требуется, соответственно, подвод тепла для обеспечения температурного уровня регенерации абсорбента, и охлаждение, поскольку в процессе поглощения водяных паров из осушаемого воздуха в АБР выделяется тепло, что снижает эффек-

тивность процесса абсорбции, теплообменные элементы могут быть, благодаря особенностям подвижной насадки, размещены непосредственно в ее объеме, что значительно сократит габариты самих аппаратов, позволит уменьшить протяжение коммуникаций от ССГВ и ГРДт.

В ТМА на основе ПНт-к может быть плодотворно использована вибрация стенок теплообменных элементов (каналов для движения охлаждаемых или нагреваемых потоков теплоносителя) для интенсификации процессов теплообмена.

**Испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИОг с подвижным трехфазным слоем насадки.** На рис. 2 представлены разработанные воздухоохладители непрямого типа НИОг с подвижным трехфазным слоем насадки «газ-жидкость-твердое тело», размещенным над многоканальным теплообменником НИОт/к, через который проходят основной и вспомогательный воздушные потоки.

На рис. 2 представлены разработанные НИОг с размещением теплообменных элементов для основного воздушного потока непосредственно в объеме подвижного трехфазного слоя насадки «газ-жидкость-твердое тело». Здесь теплообменника НИОт/к представляет собой ряд вертикально и эквидистантно установленных многоканальных плит (для прохождения основного воздушного потока, 12), между которыми расположен объем для псевдооживленного насадочного слоя, в котором, в непосредственном контакте, находятся вспомогательный воздушный поток (13) и вода, рециркулирующая через «мокрую» часть НИОг. Таким образом, трехфазный слой «газ-жидкость-твердое тело» здесь разбит на ряд автономных объемов, в которых осуществляется псевдооживление, при этом охлажденная вода (в результате испарительного охлаждения в прямом непосредственном контакте со вспомогательным воздушным потоком) в свою очередь, через стенки многоканальных плит отводит тепло от основного воздушного потока. Схема движения основного и вспомогательного воздушных потоков в НИОг может быть как противоточной, так и, в целях удобства общей компоновки всех ТМА в солнечной системе, поперечноточной. Это решение НИОг позволяет: – повысить реальную поверхность тепломассообмена в П/О

слое, поскольку здесь она определяется не столько поверхностью теплообменных элементов, как в традиционных ТМА пленочного типа, сколько реальным обновлением смоченной поверхности элементов ПН в результате их частых соударений; в результате к этой поверхности добавляется и поверхность элементов теплообменника, на которых также происходит непрерывное обновление смоченной поверхности в результате частых соударений с элементами подвижного слоя; – повысить интенсивность тепломассообмена в системе благодаря вибрационному воздействию подвижных элементов на стенки теплообменника.

На рис. 2Б представлено перспективное решение для НИОг, с разделением полного воздушного потока не на входе в аппарат, а на выходе из «сухой» части охладителя (на основной и вспомогательный воздушный потоки здесь разделяется уже охлажденный при неизменном влагосодержании полный воздушный поток состояния 11\*). Таким образом, вспомогательный поток воздуха, вступающий в прямой контакт с рециркулирующей через «мокрую» часть НИО водой, имеет здесь более низкое значение естественного предела охлаждения, поскольку он был охлажден при неизменном влагосодержании. Для такой схемы (испарительный охладитель регенеративного типа НИО-Рг) пределом охлаждения является температура точки росы поступающего в аппарат воздушного потока –  $t_p$ . Решение для НИО-Рг имеет и недостатки: повышение уровня энергозатрат на движение воздушных потоков в схеме и проблему «реконденсации» при глубоком испарительном охлаждении, которая будет рассмотрена ниже

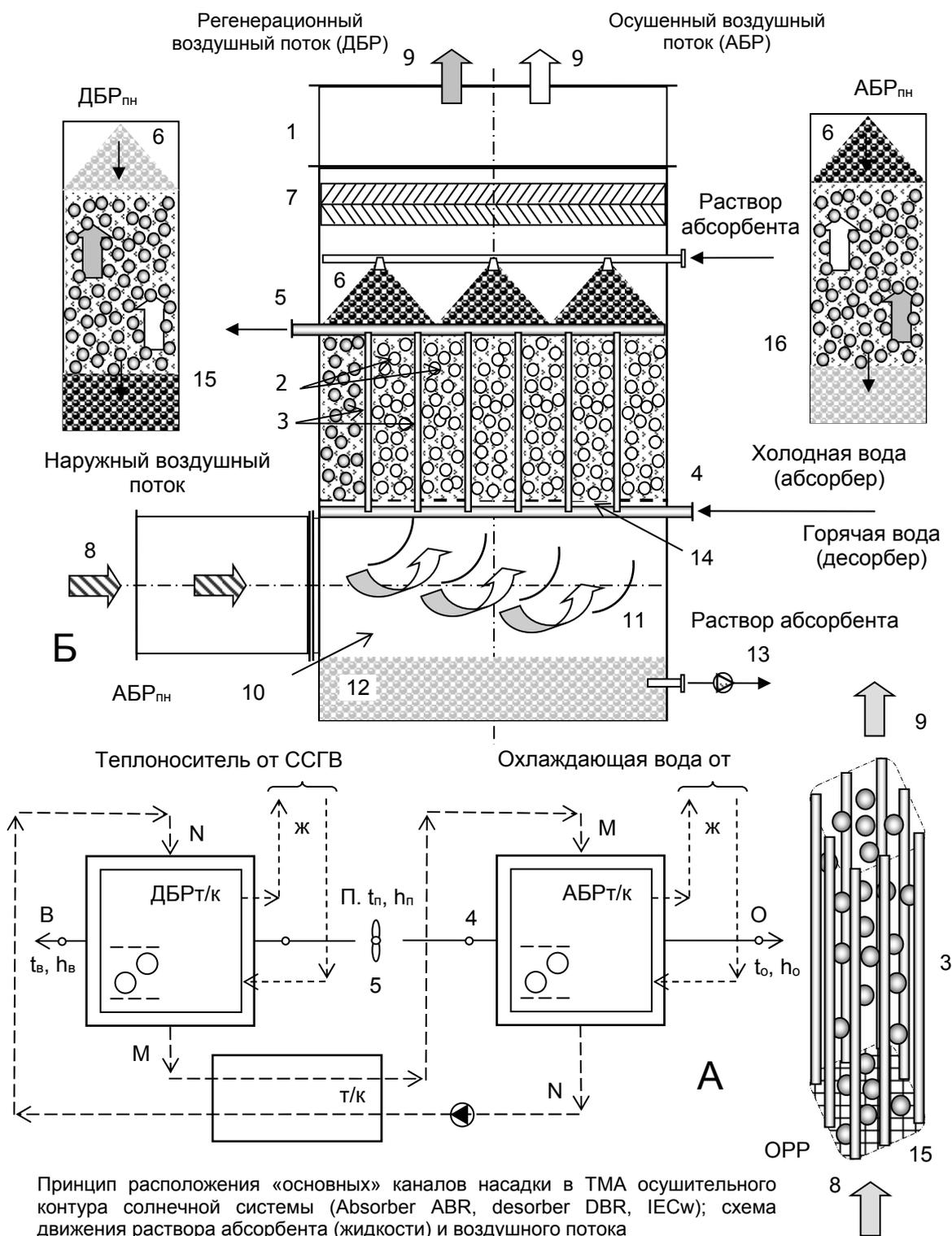
**Испарительные водоохладители сред непрямого типа НИОж и тепло-массообменные аппараты осушительного контура солнечной системы (абсорбер-осушитель воздуха АБР и десорбер-регенератор ДБР) с подвижным трехфазным слоем, работающем в ограниченном объеме.**

На рис. 3 представлены разработанные водоохладители непрямого типа НИОж с размещением теплообменных элементов для основного «продуктового» потока охлаждаемой воды в объеме подвижного трехфазного слоя насадки «газ-жидкость-твердое тело». Разработаны два варианта тепло-

массообменного аппарата: – с размещением теплообменника непосредственно в объеме п/о слоя насадки «газ-жидкость-твердое тело» (рис. 3) и вариант, в котором П/О слой трехфазной насадки размещен между горизонтально расположенными секциями теплообменника, играющими роль ОРР и сепаратора капельной влаги, соответственно в нижней и в верхней частях водоохладителя. Последнее решение приемлемо именно для водоохладителя НИОж и было в дальнейшем принято в качестве основного, как для НИОж, так и для тепло-массообменного аппарата осушительного контура солнечной системы. В этих основных вариантах разработаны и тепло-массообменные аппараты осушительного контура солнечной системы (абсорбер-осушитель воздуха АБР и десорбер-регенератор раствора абсорбента ДБР). Последнее решение в дальнейшем было принято в качестве основного, как для аппаратов осушительного контура солнечной системы. Таким образом, в качестве основных базовых решений для аппаратов осушительного и охлаждающего контуров солнечных систем, можно рекомендовать следующие новые разработки:

1. Для воздухоохладителей непрямого типа НИОг из разработанных двух принципиальных решений: 1 - с размещением трехфазного П/О слоя над теплообменником НИОт/к) и 2 - с размещением теплообменных поверхностей для основного воздушного потока непосредственно в объеме П/О слоя насадки), рекомендовано второе решение, которое способствует интенсификации теплообмена между П/О слоем и теплообменными поверхностями, а также уменьшает неравномерность распределения контактирующих потоков по всему объему насадочного слоя. Разработанное решение с размещением теплообменных поверхностей для основного воздушного потока непосредственно в объеме П/О слоя насадки позволяет снижать общие габариты (высоту) охладителя;

2. Для водоохладителей непрямого типа НИОж из разработанных двух принципиальных решений (первое - с размещением теплообменника трубчатого типа непосредственно в объеме трехфазного П/О слоя и второе - с размещением трехфазного П/О слоя насадки между секциями теплообменника, играющими роль опорно-распределительной решетки (ОРР) и сепаратора капельной влаги, соответственно) рекомендовано второе решение.



**Рис. 3.** Принципиальная схема и основные элементы водоохладителя НИОЖ и аппаратов осушительного контура АБР и ДБР с подвижной насадкой ПНт-к. Обозначения: 1 – корпусная часть; 2 – рабочая камера; 3 – теплообменник; 4 и 5 – гидравлические коллекторы-распределители; 6 – распределитель рециркулирующей жидкости; 7 – сепаратор; 8 и 9 – входящий и покидающий ТМА воздух; 10, 11 – зона воздухораспределения; 12 – емкость; 13 – насос; 14 – контур рециркуляции; 15 – OPP .

Для основных аппаратов осушительного контура, абсорбера-осушителя (АБР) и десорбера-регенератора (ДБР) с подвижной насадкой ПН из двух разработанных принципиальных решений (первое - с размещением теплообменника трубчатого типа непосредственно в объеме трехфазного П/О слоя и второе - с размещением трехфазного П/О слоя насадки между секциями теплообменника, играющими роль опорно-распределительной решетки и сепаратора капельной влаги, соответственно) рекомендовано второе решение.

### III. СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ И КОНДИЦИОНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

На основе изложенного авторами разработаны варианты принципиальных схем (в приложении к задачам охлаждения сред СХС и кондиционирования воздуха ССКВ) на основе открытого абсорбционного цикла и не прямой солнечной регенерации абсорбента. Схемы включают две основные части: предварительного осушения воздуха и испарительного охлаждения. В осушительной части тепло, необходимое для регенерации абсорбента обеспечивается гелиосистемой с плоскими солнечными коллекторами.

В качестве основных элементов разработанные схемы включают абсорбер-осушитель воздуха АБР, десорбер-регенератор абсорбента ДБР (рис. 3); испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИОг (рис. 2) и регенеративный теплообменник (позиция 5). Полный воздушный поток (П, свежий наружный воздух НВ) при осушении в абсорбере АБР снижает влагосодержание  $x_2$  и температуру точки росы  $t_p$ , что обеспечивает значительный потенциал последующего испарительного охлаждения сред (воды в НИОж или воздуха в НИОг). Последовательность построения солнечной системы:

ДБР ↔ АБР → НИОг (НИОж)

В качестве всех теплообменных аппаратов ТМА, включенных в состав СХС и ССКВ (испарительных охладителей НИОг и НИОж, абсорбера АБР, десорбера ДБР, градирни технологического назначения ГРД) используются разработанные аппараты унифицированного типа с использованием подвижной шариковой насадки (трехфазный

псевдооживленный слой «газ-жидкость-твердое тело»). Этот тип аппарата обеспечивает возможность самоочистки рабочих поверхностей и стенок корпуса теплообменного аппарата ТМА, что, при работе с наружным воздухом и растворами абсорбентов представляется принципиально важным условием поддержания работоспособности альтернативных систем. Это выгодно отличает и систему с подачей охлажденной воды в кондиционируемое помещение (вариант ССКВ), которая нигде не контактирует с наружным воздухом. В теплообменники абсорбера поступает вода от испарительного охладителя воды – технологической градирни ГРДт, а в теплообменники десорбера поступает теплоноситель от солнечной водонагревательной системы ССГВ, в составе СКж (8) и БТА (9). На потоках горячего крепкого абсорбента из десорбера и холодного слабого из абсорбера установлен теплообменник (5). В аппаратах используются автономные вентиляторы (например, 8 для ГРДт, рис. 9 и 13), причем вентилятор абсорбера обслуживает и установленный дальше по линии испарительный охладитель НИО, в который поступает осушенный воздушный поток.

Разработаны варианты схемных решений с дополнительными теплообменниками:

- на холодном вспомогательном воздушном потоке из НИОг для охлаждения наружного воздуха перед АБР и для промежуточного охлаждения осушенного в абсорбере воздушного потока;

- на выбрасываемом в атмосферу увлажненном и горячем воздухе из десорбера для предварительного подогрева наружного воздуха, поступающего в десорбер.

В абсорбере может осушаться только часть поступающего в охладительный контур воздушного потока (в НИОг), – «вспомогательного» воздушного потока, который в контакте с водой рециркуляционного контура («мокрая» часть ТМА, «мокрые» каналы НИОг) обеспечивает охлаждение как «вспомогательного», так и «основного» воздушных потоков. Как будет показано в работе, такой вариант схемы может быть основой опреснителя, предназначенного для получения питьевой воды. Последовательность построения солнечной системы кондиционирования воздуха:

ССКВ: ДБР ↔ АБР → НИОг

Разработан также вариант ССГВ, когда в «основные» каналы НИОг поступает смесь наружного воздуха (НВ) и осушенного в абсорбере (П\*).

Вариант ССКВ с использованием НИО-Rg (испарительного охладителя НИО регенеративного типа с разделением охлажденного в «сухой» части НИО полного воздушного потока после НИО-Rg), приведен на рис. 2Б. Это решение обеспечивает наиболее глубокое охлаждение воздушного потока, но сопряжено с ростом удельных энергозатрат. Развернутая схема ССКВ приведена на рис. 5.

Особый интерес для СХС и систем кондиционирования воздуха ССКВ представляют схемы, построенные на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением АБРио (рис. 4). На рис. 4Б представлен вариант такой схемы с частичным смешением наружного и осушенного воздуха на входе в охладительную часть абсорбера АБРио, а на рис 4В – элемент конструкции АБРио. В целом АБРио по конструктивному оформлению близок к НИОг, являясь четырехпоточным ТМА, где в соседних каналах одновременно реализуются процессы осушения «основного» воздушного потока раствором абсорбента и испарительного охлаждения в объеме ПН при контакте «вспомогательного» воздушного потока и рециркулирующей воды. В АБРио «основной» воздушный поток не только осушается, но одновременно и охлаждается, так что в принципе для такой схемы ССКВ испарительный воздухоохладитель НИОг может отсутствовать.

Для построения СХС и систем кондиционирования воздуха ССКВ предназначены схемы, в которых, в качестве испарительного охладителя используется водоохладитель непрямого типа НИОж. Последовательность построения солнечной системы:

СХС: ДБР ↔ АБР → НИОж

Для создания ГРДт технологического назначения, обслуживающей абсорбер-осушитель АБР можно рекомендовать решение, где рабочая зона аппарата экранирована снизу опорно-распределительной решеткой ОРР, а в верхней части каплеотделителем жалюзийного типа (сепаратором капельной влаги). Воздух, осушенный в абсорбере АБР и имеющий низкую температуру точки росы, то есть высокий потенциал для последующей реализации процесса испарительного охла-

ждения среды, поступает в водоохладитель НИОж, где обеспечивается глубокое охлаждение воды, которая может использоваться в вентилируемых теплообменниках-охладителях, устанавливаемых непосредственно в кондиционируемых помещениях, либо холодильных камерах. В случае задачи кондиционирования воздуха, в ССКВ, здесь отпадает необходимость в воздуховодах, имеющих значительные размеры и требующих расходов на соответствующие строительные работы, особенно в случае уже построенных зданий. Вместо громоздких воздуховодов используется прокладка теплоизолированных труб небольшого диаметра для охлажденной воды.

С точки зрения задачи кондиционирования воздуха целесообразна совместная подача в помещение как воздушного потока, прошедшего термовлажностную обработку в НИОг, так и охлажденной в НИОж воды. В этом случае ССКВ включает последовательно абсорбер АБР, воздухоохладитель испарительного типа НИОг и водоохладитель НИОж, в которые поступает осушенный в абсорбере воздушный поток, то есть охладительный контур ССКВ построен следующим образом:

ДБР ↔ АБР → ↓ НИОг / НИОж

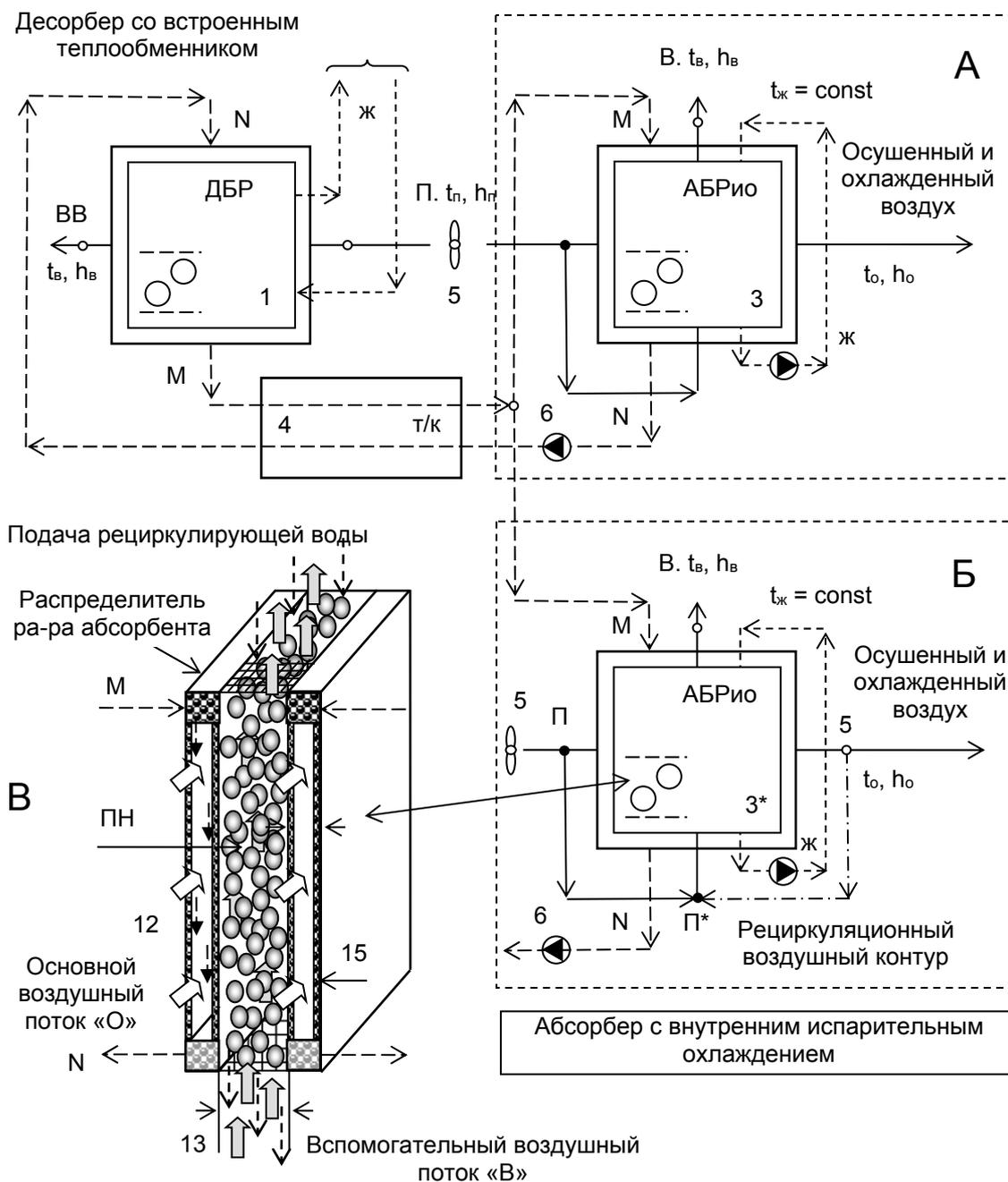
В НИОг и НИОж количество испарившейся воды в рециркуляционном водном контуре компенсируется подпиткой свежей водой.

Особый интерес представляет решение, когда для охлаждения абсорбера АБР используется часть охлажденной в НИОж воды. Это позволяет исключить из схемы градирню технологического назначения ГРДт. Количество этой низкотемпературной воды, направляемой в АБР, требует анализа распределения потоков в пределах всей схемы СХС.

#### IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЭКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАЗРАБОТАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ

На рис. 6 приведены результаты сравнительного эко-энергетического анализа для традиционной (парокомпрессионной) СКВ и абсорбционных осушительно-испарительных вариантов ССКВ [на основе разработанных солнечных систем для вариантов ТМА осушительного и охладительного контуров с выносными теплообменниками (рис. 5А)

Солнечная система ССКВ с абсорбером с внутренним испарительным охлаждением АБРИо  
 Solar liquid-desiccant cooling and air conditioning systems (Solar / ABRec)

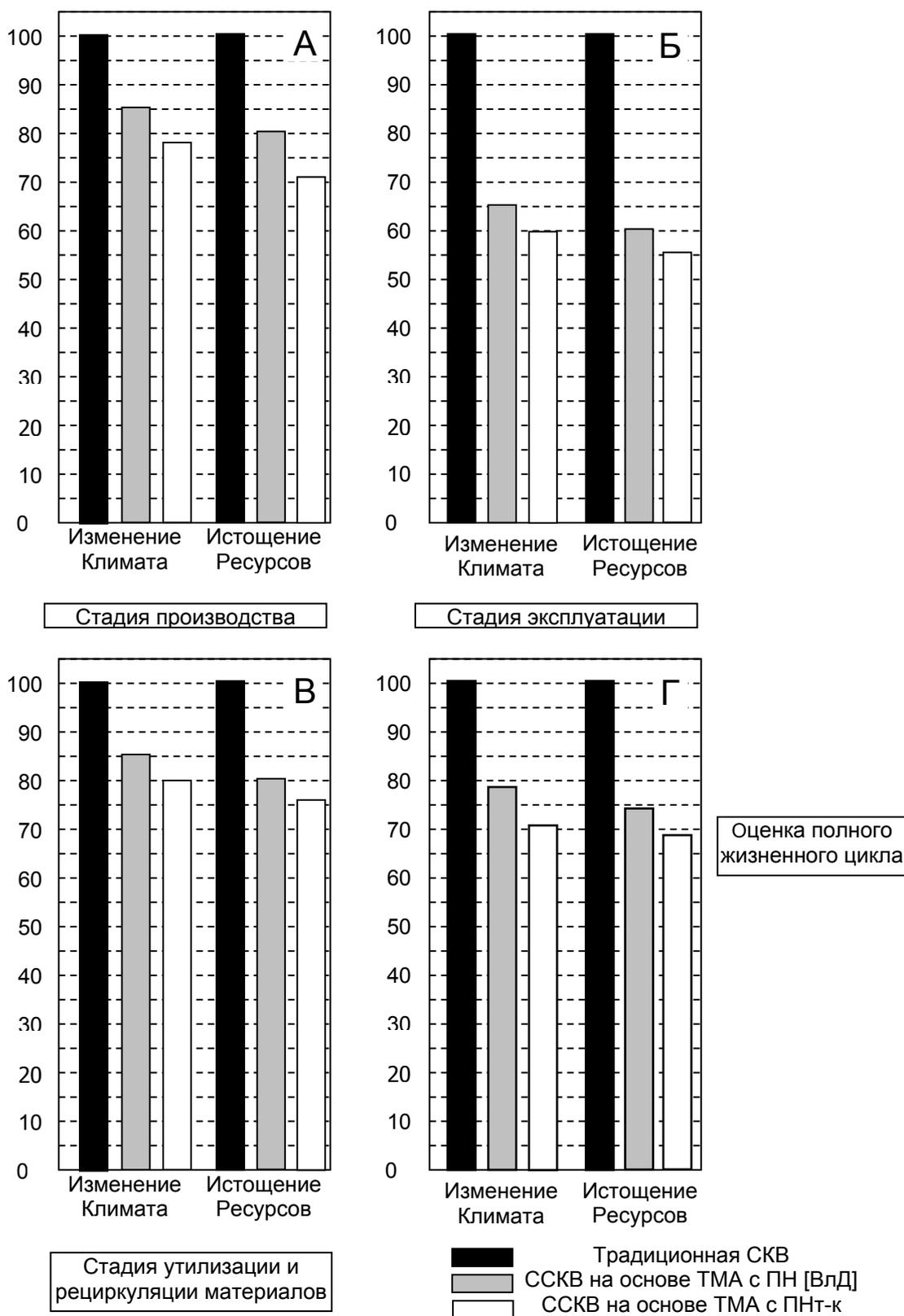


**Рис. 4.** Осушительный контур солнечной системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением АБРИо.

А – с АБРИо; Б – с частичным смешением наружного и осушенного воздуха на входе в охлаждающую часть абсорбера АБРИо; В – элемент конструкции АБРИо

Обозначения: 1 – десорбер ДБР; 3 и 3\* – абсорбер с внутренним испарительным охлаждением АБРИо; 4 – теплообменник крепкого горячего и слабого холодного растворов абсорбента; 5 – вентилятор; 6 – водяной насос





**Рис. 6.** Сравнение экологического воздействия на стадиях производства (А), в периоды эксплуатации (Б), утилизации (В) и в рамках полного жизненного цикла (Г) для традиционной (парокомпрессионной) СКВ и абсорбционных осушительно-испарительных вариантов ССКВ (на основе ПН и ПНт-к насадного слоя ТМА).

и с новыми разработанными вариантами с размещением теплообменника трубчатого типа непосредственно в объеме трехфазного псевдооживленного слоя (рис. 5Б)].

Анализ выполнен с использованием методологии и базы данных «Полный жизненный цикл» (ПЖЦ, международные стандарты ISO (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043, «ECO-INDICATOR 99», база данных программы «SIMAPRO-6») [15]. Результаты анализа позволяют сделать вывод о существенном преимуществе разработанных ССКВ (СХС) на основе подвижной насадки ПНт-к по основным экологическим показателям.

В качестве **основных задач для предстоящего исследования**, вытекающих из принципов новых разработок теплообменной аппаратуры на основе ПНт-к, определены следующие:

1. изучение поведения псевдооживленных насадочных слоев «газ-жидкость-твердое тело» (п/о слоя) в ограниченном объеме, когда он расположен между вертикально или горизонтально установленными теплообменными поверхностями в воздухоохладителях НИОг или НИОж, включая вопросы:

- влияние «стесненности» П/О слоя на основные режимы и характеристики псевдооживления, такие как аэродинамическое сопротивление, динамическая высота слоя, порозность псевдооживленного слоя насадки, задержка жидкости, каплеунос;

- изучение интенсифицирующего воздействия вибрации теплообменных поверхностей под воздействием подвижного насадочного слоя на интенсивность процессов совместного теплообмена;

- выработка рекомендаций по выбору оптимальных конструктивных и режимных параметров для проектирования ТМА на основе ПНт-к и солнечных систем: осушительного контура в составе абсорбера-осушителя и десорбера-регенератора абсорбента и охладительного контура на основе испарительных водо- и воздухоохладителей непрямого типа НИОг и НИОж.

2. Анализ принципиальных возможностей солнечных систем ССКВ и СХС, включая:

- обеспечение требуемых термовлажностных характеристик воздушного потока в ССКВ;

- Обеспечение требуемого уровня охлаждения в СХС;

- Сравнительный анализ энерго-экологических характеристик разрабатываемых солнечных систем ССКВ и СХС.

## ВЫВОДЫ

1. Разработаны новые схемные решения солнечных систем на основе открытого абсорбционного цикла с непрямой регенерацией абсорбента и использованием теплообменных аппаратов в виде подвижных насадочных слоев в осушительном и охладительном контурах системы; разработаны новые схемные решения ТМА непрямого типа с подвижной насадкой ПН, с размещением теплообменников непосредственно в объеме насадочного слоя, что существенно расширяет возможности солнечных холодильных систем (СХС и ССКВ), снижая общее число аппаратов в системе и соответствующие энергозатраты на организацию движения теплоносителей.

2. Новые решения с использованием подвижных трехфазных насадочных слоев «газ-жидкость-твердое тело» позволяют: повысить надежность эксплуатации оборудования в условиях повышенной загрязненности окружающей среды, оптимальным образом ввести теплообменник в объем насадочного слоя и интенсифицировать процессы теплообмена в аппаратах солнечных систем; особую важность подвижные насадочные слои приобретают в аппаратах осушительного контура солнечных систем при работе на концентрированных растворах абсорбентов..

3. Выполненный, на основе методологии «Полный Жизненный цикл» («Life Cycle Assessment», LCA) сравнительный анализ новых, разработанных солнечных систем, показал, что разработанные системы, помимо снижения энергопотребления, обладают существенными преимуществами перед пароконпресссионной холодильной техникой по основным показателям экологического воздействия на окружающую среду.

## Литература (References)

[1] Daffi J.A., Beckman Y.A. *Teplovie procesi s ispolzovaniem solnechnoy energii* [Heat processes with the use of solar energy], Moscow, Mir, 1977, 566 p. (In Russian).

[2] Doroshenko A. V., Glauberman M. A. *Alternativnaia energetika. Solnechnie sistemi teplohladosnabjeniya*. [Alternative energy. Refrigerating and Heating Systems], Odessa, ONU, 2012. 446 p. (In Russian).

[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.

[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 Desiccant 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.

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.

[10] 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.

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

[12] Maisotsenko V., Leland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling. [Proc. 21<sup>st</sup> Int. Cong of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.

[13] 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

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

[15] 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, тепло-массообмен, холодильная техника, альтернативная энергетика.

e-mail: [dor\\_av43@i.ua](mailto:dor_av43@i.ua)



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

e-mail: [leesoul@mail.ru](mailto:leesoul@mail.ru)



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

e-mail: [allaantonova62@gmail.com](mailto:allaantonova62@gmail.com)