

Solar Multi-stage Refrigeration Systems on the Basis of Absorber with the Internal Evaporative Cooling

Doroshenko A.V., Kirillov V.H., Antonova A.R., Liudnickyy K.V.

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

Abstract. In the article, the developed schematics are presented for the alternative refrigeration systems and air-conditioning systems, based on the use of absorbing cycle and solar energy for the regeneration of absorbent solution. Multi-stage principle of construction of drying and cool contours of solar systems is used with growth of concentration of absorbent on the stages of cooler. An absorber with internal evaporative cooling, allowing to remove the separate evaporated cooler, usually included after the absorber of the proper stage, is developed. Heat-mass-transfer apparatus of film-type, entering in the complement of drying and cool contours compatible and executed on the basis of multichannel compositions from polymeric materials. The preliminary comparative analysis of possibilities of the solar refrigeration systems and air-conditioning systems is executed.

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

Sistemele frigorifice solare cu multe trepte pe bază absorbitorului cu răcire evaporativă internă

Doroșenko A.V., Chirilov V.H., Antonova A.R., Liudnițcghii K.V.

Institutul de Cercetări frigorifice educaționale, de Criotehnologie și Eco-Energetică
Academia Națională de Tehnologii Alimentare,
Odesa, Ucraina

Rezumat. Sunt prezentate soluții schematic pentru sistemelor frigorifice alternative și sistemelor de climatizare, bazate pe utilizarea unui ciclu absorbțional și energiei solare pentru regenerarea soluției absorbantului. Se utilizează principiu cu multe etape de construire a buclelor de desecare și de răcire prin creștere a concentrației absorbantului de-a lungul treptelor de răcitor. Este elaborat absorbitor cu răcire evaporativă, care dă posibilitatea de a eînălțura un răcitor evaporativ separat, care este amplasat obișnuit după absorbitor al treptei corespunzătoare. Aparataj de schimb de căldură și de masă de tip pelicular, care este componentă buclelor de desecare și de răcire este unificată și fabricată la bază compoziții din materialele polimerice cu multe canale. Este efectuată analiza prealabilă a parametrilor de performanță a sistemelor solare frigorifice corespunzătoare.

Cuvinte cheie: sisteme solare, desecare de aerului, aparate de schimb de masă și de căldură, fluvii peliculare, absorbție, desorbție, răcire evaporativă.

Солнечные многоступенчатые холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением

Дорошенко А.В., Кириллов В.Х., Антонова А.Р., Людницкий К.В.

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

Аннотация. В статье представлены разработанные схемные решения для альтернативных холодильных систем и систем кондиционирования воздуха, основанные на использовании абсорбционного цикла и солнечной энергии для регенерации (восстановления) раствора абсорбента. Использован многоступенчатый принцип построения осушительного и охладительного контуров с возрастанием концентрации абсорбента по ступеням охладителя. Разработан абсорбер с испарительным охлаждением, позволяющий устранить отдельный испарительный охладитель, обычно включаемый после абсорбера соответствующей ступени. Тепло-массообменная аппаратура пленочного типа, входящая в состав осушительного и охладительного контуров унифицирована и выполнена на основе многоканальных композиций из полимерных материалов. Выполнен предварительный сравнительный анализ возможностей солнечных холодильных систем.

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 _e)	Эквивалентный диаметр канала насадки
х, г/кг	влажность (air humidity)
ОС	осушенный воздух (dried airstream)
НВ	наружный воздух (outdoor airstream)
ВВ	выбрасываемый в среду воздух (exhaust airstream)

ВВЕДЕНИЕ

Солнечные многофункциональные системы, основанные на теплоиспользующем абсорбционном цикле могут обеспечивать решение задач осушения воздуха, теплохладоснабжения и кондиционирования. В этих системах предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения сред (солнечные холодильные системы СХС) и термовлажностной обработки воздуха (солнечные системы кондиционирования воздуха ССКВ) [1, 5-7]. Разработанные решения для охладителей охватывают нужды энергетики, химической и пищевой технологий и позволяют решать задачи охлаждения, не прибегая к традиционной парокомпрессионной технике. Это позволяет также существенно улучшить их энергетические показатели [8]. Авторами разработано новое поколение солнечных многофункциональных систем на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением.

I. СОЛНЕЧНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АБСОРБЕРА С ВНУТРЕННИМ ИСПАРИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ АБР/ИО

Поскольку в абсорбере, при поглощении влаги из воздушного потока раствором абсорбента, выделяется тепло, это приводит к росту температуры и снижению эффективности процесса осушения воздуха. Работа абсорбера-осушителя обычно организуется (рис. 1) с внешним (позиция А, 2, 11), либо со встроенным (позиция Б, 1) теплообменником, охлаждаемым дополнительной градирней (испарительным водоохладителем технологического назначения ГРДг, 8). Это усложняет схему и увеличивает энергозатраты. Интерес представляет вариант абсорбера с внутренним испарительным охлаждением [1, 9-10].

На рис. 1 (позиции В и Г) приведены два варианта таких абсорберов-осушителей с внутренним испарительным охлаждением (АБР/ИО), отличающихся местом разделения полного воздушного потока на основной, осушаемый в каналах, по стенкам которых стекает пленка абсорбента, и

вспомогательный, идущий в соседних, чередующихся каналах, где по стенкам стекает водяная пленка, испаряющаяся во «вспомогательный» воздушный поток, охлаждающаяся и отводящая тепло через разделительную стенку от «осушительных» каналов. Насадка такого абсорбера представляет многоканальную структуру с чередующимися «осушительными» и «охлаждающими» каналами и, в принципе, может выполняться из полимерных многоканальных структур, поскольку термическое сопротивление разделяющих каналы тонких полимерных стенок, сопоставимо с термическим сопротивлением стекающих жидкостных пленок абсорбента и воды (по обе стороны разделительной стенки).

В варианте АБР/ИО (рис. 1В) полный воздушный поток, поступающий в абсорбер, делится на входе в аппарат. Естественным пределом испарительного охлаждения здесь является температура мокрого термометра наружного воздуха t^1_m . В регенеративном варианте АБР/ИО-Р (рис. 1Г) в «охлаждающие» каналы поступает воздушный поток, уже прошедший осушение, со сниженным пределом испарительного охлаждения. Для этого варианта пределом испарительного охлаждения, в принципе, является температура точки росы наружного воздуха t^1_p , что существенно расширяет возможности такого комбинированного осушителя и охладителя воздуха. Основные варианты абсорберов АБР/ИО-Р могут быть сориентированы на решение задачи охлаждения воздуха (АБР/ИО-Рг, рис. 2А) и получения холодной воды (АБР/ИО-Рж, рис. 2Б).

Рассмотрим построение ССКВ по формуле: [(ДБР↔АБР) – НИО] → АБР/ИО-Рг (рис. 2А). Авторами ранее [1, 9-10] рассматривалось построение солнечной системы ССКВ на основе блока [(ДБР↔АБР) – НИО], где предварительное осушение наружного воздуха в абсорбере обеспечивало последующее глубокое охлаждение основного воздушного потока «О» в каналах НИО. На рис. 2А это решение представлено в виде первой ступени осушения воздуха и его бесконтактного испарительного охлаждения в НИО. Вторая ступень охлаждения воздуха построена по формуле АБР/ИО-Рг. По сути, это такая же схема АБР-НИО, как и в первой ступени, но в ней, для охлаждения абсорбера,

используется часть охлажденного при неизменном влагосодержании «основного» воздушного потока «О» от испарительного воздухоохладителя непрямого типа НИО2. В чередующихся каналах насадки абсорбера АБР/ИО-Рг одновременно реализуются два процесса: осушения воздуха раствором абсорбента и охлаждение этих каналов частью холодного «продуктового» основного воздушного потока из НИО. Процесс осушения воздушного потока здесь протекает со снижением температуры осушаемого воздуха, так что необходимость в отдельном испарительном воздухоохладителе во второй ступени, в принципе, отпадает. Важное значение имеет правильный выбор соотношения основного и вспомогательного воздушных потоков, $l = G_o / G_v$ в НИО.

Аналогичным образом, решение СХС по формуле [(ДБР↔АБР) – НИО] → АБР/ИО-Рж, по сути, является дальнейшим развитием схемы [(ДБР↔АБР) – ГРД], в которой для охлаждения абсорбера используется часть «продуктовой» воды от градирни ГРД [9-10] (рис. 2Б). В этом решении (абсорбер АБР/ИО-Рж) процесс осушения воздушного потока протекает со снижением температуры осушаемого воздуха и одновременным получением охлажденной «продуктовой» воды.

Разработанные перспективные решения солнечных систем (рис. 2) на основе АБР/ИО-Рг (ССКВ) и АБР/ИО-Рж (СХС) позволяют устранить из схемы отдельный испарительный охладитель во второй ступени охлаждения (НИО или ГРД, соответственно), снизив, тем самым, габариты, вес и стоимость системы в целом, но требуют отдельного исследования, поскольку, одновременно с понижением температурного уровня охлаждения, может иметь место возрастание опасности реконденсации в охлаждающей части (в соответствующих каналах) абсорбера АБР/ИО [9-10].

Разработанная концепция создания солнечных холодильных систем СХС на основе АБР/ИО-Рж иллюстрируется в развернутом виде на рис. 3, при этом:

1. СХС выполнена в двухступенчатом варианте, и состоит из автономных осушительно-охлаждающих блоков, первый блок решен по формуле [(ДБР↔АБР)–НИО] (в составе элементов 1-7), а во втором вместо аналогичного блока используется разработанный вариант охладителя АБР/ИО-Рж (элемент

4**), причем каждая ступень регенерации абсорбента (ДБР, элементы 5 и 6) замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР, элементы 1 и 4**) [9-10];

2. 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 (12); раствор абсорбента последовательно проходит каждую ступень регенерации, в которую поступает «свежий» наружный воздух (рис. 3, позиция Б);

3. Схема осушительной части может быть построена так, чтобы каждая ступень регенерации (ДБР) была замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР), при этом на вторую ступень десорбера ДБР2 поступает только часть абсорбента после первой ступени ДБР1, и направляется на вторую ступень охлаждения, в абсорбер АБР/ИО-Рж, что приводит к росту концентрации абсорбента от ступени к ступени (в диапазоне возможных концентраций используемого раствора бромистого лития LiBr, что ограничено опасностью начала кристаллизации раствора при высоких концентрациях абсорбента);

4. Внутренняя рекуперация тепла обеспечивается системой теплообменников: на линиях горячий-крепкий (М) и холодный-слабый (N) растворы бромистого лития LiBr установлены т/о 11 и 11*; на холодных выбросных воздушных потоках из НИО и АБР/ИО-Рж установлены т/о 9 и 10 (возможно также 9* и 10*);

В охладительной части схемы последовательно используется в первой ступени охлаждения воздухоохладитель непрямого типа НИО (2), включенный в схему после соответствующей ступени абсорбции; во второй ступени СХС – осушительно-охладительный блок АБР/ИО-Рж (4**).

II. ОСОБЕННОСТИ ПЛЁНОЧНЫХ ТЕЧЕНИЙ В ТМА ОСУШИТЕЛЬНОГО И ОХЛАДИТЕЛЬНОГО КОНТУРОВ

Работа теплообменников аппаратов пленочного типа во многом зависит от гидродинамической обстановки в его насадочном слое. Наиболее эффективным способом контактирования фаз для

плёночных аппаратов является противоточная схема, при которой ламинарное (ламинарно-волновое) гравитационное течение плёнки жидкости взаимодействует с турбулентным восходящим потоком газа. Для выявления особенностей таких двухфазных течений, рассмотрим математическое описание течения тонкого слоя жидкости в контакте с газовым потоком. Течение тонкого слоя жидкости по вертикальной поверхности в контакте с противоточным потоком газа определяется следующей краевой задачей [3]:

$$1) \text{ уравнение движение плёнки жидкости -} \\ \nu_l \frac{d^2 V_x}{d y^2} = -g, \quad 0 \leq y \leq h \quad (1)$$

здесь продольная скорость $V_x(y)$ жидкости;

$y = h$ – уравнение поверхности раздела фаз;

2) граничные условия:

$$\text{при } y = 0: V_x = 0 \text{ (условие прилипания);} \quad (2)$$

$$\text{при } y = h \quad \mu_l \frac{d V_x}{d y} = -\tau_g \quad (3)$$

(непрерывность касательных напряжений),

где $\tau_g = \xi \frac{\rho_g V_g^2}{8}$ – касательное напряжение со стороны газа;

3) условие постоянства расхода жидкости

$$\int_0^h V_x dy = q_l^l \text{ (const)} \quad (4)$$

Из уравнения (1) и граничных условий (2) – (3) распределение скоростей $V_x(y)$ определяется соотношением:

$$V_x(y) = -\frac{g}{\nu_l} \frac{y^2}{2} + \left(\frac{g}{\nu_l} h - \frac{\tau_g}{\mu_l} \right) y \quad (5)$$

Условие (4) с учётом распределения (5) даёт кубическое уравнение относительно толщины слоя:

$$h^3 - \frac{3\tau_g}{2\rho_l g} h^2 - \frac{3q_l^l \nu_l}{g} = 0 \quad (6)$$

$$\text{или } h_1^3 - \bar{\tau} h_1^2 - 1 = 0 \quad (7),$$

где $h_1 = \frac{h}{\delta_l^N}$ – безразмерная относительная

толщина слоя; δ_l^N – толщина плёнки жидкости, определяемая известной формулой Нуссельта:

$$\delta_l^N = \sqrt[3]{\frac{3 q_l' v_l}{g}} = \sqrt[3]{\frac{3 Re_{fl} v_l^2}{g}} \quad (8)$$

в случае отсутствия воздействия газового потока.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau_g}{\tau_{fl}}, \quad \tau_{fl} = \frac{2}{3} \rho_l g \delta_N, \quad \tau_g = \xi \frac{\rho_g W_g^2}{8}.$$

Численное решение уравнения (7) даёт следующую аппроксимацию:

$$h_l = 1 + 0.003 V_g^{1.0362} \quad (9)$$

Скорость жидкости на свободной поверхности определяется из (5) при $y = h$

$$V_x(h) = \frac{g}{v_l} \frac{h^2}{2} - \frac{\tau_g}{\mu_l} h \quad (10)$$

Рассмотрим особенности течения газа в плоскопараллельной насадке плёночного охладителя. В основу предлагаемого теоретического исследования течения газа на начальном участке короткого канала в контакте с плёнкой жидкости положены следующие модельные представления:

– течение газа описывается двухслойной математической моделью, состоящей из вязкого подслоя, примыкающего к поверхности раздела фаз и ядра потока;

– в вязком подслое (критический слой) преобладают значительные касательные напряжения, здесь предполагается постоянство по величине касательных напряжений;

– в ядре потока, учитывая, что течение происходит в области начального участка канала, на формирование и развитие профиля скорости сказываются, прежде всего, силы вязкости, а поскольку числа Рейнольдса по газу относятся к переходной области, то профиль скорости на начальном участке имеет много общего с профилем, характерным для ламинарного течения.

Течение газа в вязком подслое $r - \delta \leq y \leq r$ (δ – толщина подслоя), где касательное напряжение τ постоянно, определяется следующей задачей

$$\begin{cases} \mu_g \frac{dU}{dy} = -\tau, & r - \delta \leq y \leq r \\ \text{при } y = r & U = -V_l \end{cases} \quad (11)$$

где $U(y)$ – скорость газа в вязком подслое, м/с; V_l – скорость жидкости на свободной

поверхности, м/с, а распределение скорости газа в ядре потока является решением задачи:

$$\frac{d^2 W}{dy^2} = \frac{1}{\mu_g} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$\text{при } y = 0 \quad W = 0 \quad (12)$$

$$\text{при } y = r - \delta \quad \mu_g \frac{dW}{dy} = -\tau = -\frac{\xi}{8} \rho_g W_0^2$$

Решение системы (11) и (12) –

$$U(y) = \frac{\tau}{\mu_g} (r - y) - V_l, \quad \tau = \frac{\xi}{8} \rho_g U_0^2 \quad (13)$$

$$W(y) = \frac{a y^2}{2} + b y, \quad (14),$$

$$\text{где } a = \frac{1}{\mu_g} \frac{dp}{dx} = -\frac{\xi W_0^2}{8 v_g r (1 - \lambda)},$$

$$b = \frac{\tau \delta_l}{\mu_g} - \frac{a}{2} (r - \delta_l)^2 - V_l;$$

W_0 – средняя по расходу скорость газа, м/с;

$\lambda = \frac{\delta}{r}$ – относительная толщина вязкого подслоя.

По заданной средней скорости газа, получено уравнение относительно толщины вязкого подслоя:

$$\frac{\xi Re_g}{192} \eta^2 + \frac{V_l}{W_0} \eta + \left(1 + \frac{V_l}{W_0} - \frac{\xi Re_g}{64} \right) = 0$$

$$\left(\eta = 1 - \lambda = 1 - \frac{\delta}{r} \right) \quad (15)$$

В результате установлено, что коэффициент сопротивления удовлетворяет уравнению:

$$\frac{2}{3} Re_g \xi + 80 \sqrt{\xi} - \left(64 + \frac{4800}{Re_g} \right) = 0 \quad (16)$$

Численное решение данного уравнения даёт следующую аппроксимацию для коэффициента сопротивления в вязком подслое:

$$\xi = 39,4808 Re_g^{-0,9138} \quad (17)$$

Полученные результаты позволяют рассчитывать параметры пленочного взаимодействия в любом ТМА как осушительного, так и охладительного контуров солнечных абсорбционных систем.

III. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ АБСОРБЕРА С ВНУТРЕННИМ ИСПАРИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

На рис. 4 в поле Н-Т диаграммы влажного воздуха показано протекание процессов в основных элементах сравниваемых солнечных систем кондиционирования воздуха СХС, оформленных по формулам:

$$\begin{aligned} &[(ДБР1 \leftrightarrow АБР1) - НИО] \rightarrow \\ &[(ДБР2 \leftrightarrow АБР2) - ГРД] \\ &[(ДБР1 \leftrightarrow АБР1) - НИО] \rightarrow \\ &[(ДБР2 \leftrightarrow АБР/ИО - Рж)] \text{ (рис. 4А)} \end{aligned}$$

Начальное влагосодержание наружного воздуха выбрано значительно выше критической величины $x^* \approx 12,5 \text{ г/кг}$ [1], что требует обязательного предварительного осушения воздуха перед испарительным охлаждением. Анализ выполнен на основе ранее полученных в ОГАХ экспериментальных данных по эффективности процессов в ТМА осушительного и охладительного контуров [1-2, 9] на насадке из многоканальных многослойных поликарбонатных плит с параметрами слоя: $d_c = 15 \text{ мм}$. Использование полимерных многоканальных насадочных структур в случае ИО непрямого типа (НИО, АБР/ИО-Р) не приводит к сколь либо существенному снижению эффективности процесса, поскольку термическое сопротивление разделяющей каналы стенки соизмеримо с термическим сопротивлением жидкостных пленок, стекающих по внутренним поверхностям каналов. Для НИО была принята в расчетах величина эффективности процесса охлаждения по основному и вспомогательному потокам, равная $E_O = E_B = (t^l - t^2)/(t^l - t_M) = 0.65$, при эффективности теплообменников $E_{T/O} = 0.8$. Температура воды, рециркулирующей через «мокрую» часть НИО, принята $t_g^* = t_M^l + 1,5 - 2,5^\circ\text{C}$. На самом деле эффективность охлаждения вспомогательного воздушного потока несколько выше, чем основного, величина E_a несколько выше чем E_m , а реальное значение величины t_g^* зависит от соотношения расхода воздушных потоков в «сухой» и «мокрой» частях НИО, $l = G_m / G_a$ [1, 2], так что результаты выполненного анализа носят предварительный характер и несколько занижены.

Сравнительный анализ выполнен для начальных параметров наружного воздуха: $t^l_B = 40^\circ\text{C}$, $x^l_B = 20 \text{ г/кг}$, то есть, заведомо, для самых «тяжелых» внешних условий для использования испарительных охладителей сред. Видно, что процесс осушения воздуха в АБР/ИО реализуется при его одновременном охлаждении, причем линия изменения состояния воздушного потока носит криволинейный характер (линия 3-8). Линия изменения состояния вспомогательного воздушного потока также криволинейна и до выхода из насадки ТМА выходит на кривую $\phi = 100\%$, с определенного момента следуя непосредственно по ней (участок 8-9*-9**). Построение этих кривых выполнено по методике, разработанной на основе метода «энтальпийного потенциала» в работе [2]. Следует отметить опасность снижения эффективности процесса в этой области, что требует особого анализа. Решение вопроса может лежать на регулировании соотношения воздушных потоков в чередующихся каналах АБР/ИО-Р. Получены сравнительные результаты для трех сравниваемых вариантов СХС:

1: СХС по формуле: ГРД на наружном воздухе НВ:

$$t^l 40^\circ\text{C}, t^l_M 28^\circ\text{C}, t^l_P 25^\circ\text{C}, x^l 20 \text{ г/кг}; \rightarrow t^2_{\text{ж}} 32,5^\circ\text{C};$$

2: СХС по формуле:

$$\begin{aligned} &АБР1 \rightarrow НИО \rightarrow АБР2 \rightarrow ГРД: \\ &t^l 31,8^\circ\text{C}, t^l_M 17,5^\circ\text{C}, x^l_B 7,5 \text{ г/кг}, \rightarrow \\ &t^2_{\text{ж}} 22,0^\circ\text{C}; \end{aligned}$$

3: СХС по формуле:

$$\begin{aligned} &АБР \rightarrow НИО \rightarrow АБР/ИО-Рж: \\ &t^l 23,0^\circ\text{C}, t^l_M 13,0^\circ\text{C}, x^l_B 6,5 \text{ г/кг}, \rightarrow \\ &t^2_{\text{ж}} 17,5^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Видно, что СХС, построенная по формуле

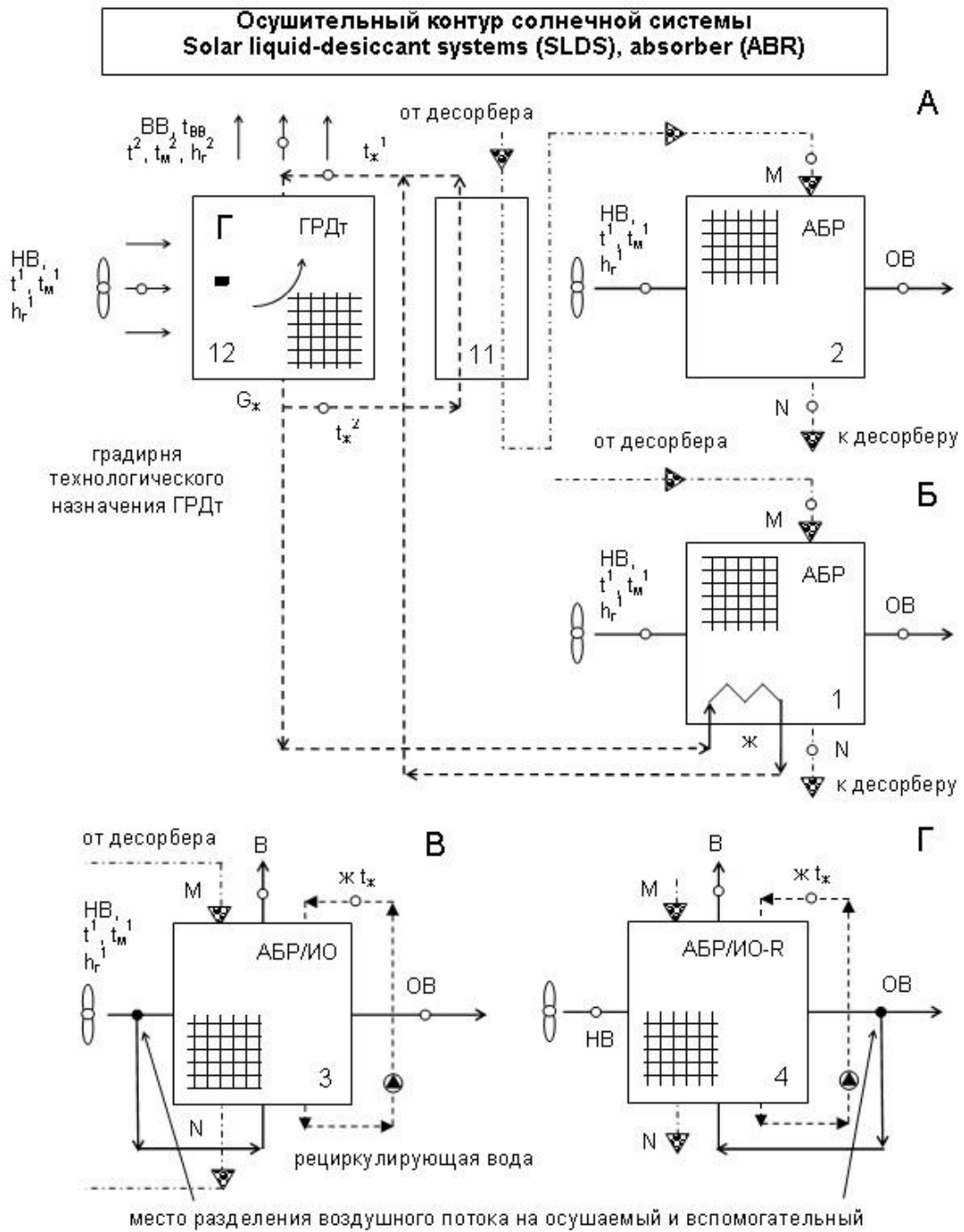


Рис. 1. Принципиальные схемы узла абсорбции. Обозначения к рис. 1-4: 1,2 – абсорбер-осушитель наружного воздуха АБР; 3 и 4 – абсорбер с внутренним испарительным охлаждением АБР/ИО и АБР/ИО-Р (4* и 4** – АБР/ИО-Рг и АБР/ИО-Рж, соответственно); 5,6 – десорбер первой и второй ступеней, ДБР; 7 – испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИО; 8 – градирня технологического назначения ГРДт; 9, 10, 11 – теплообменники; 12 – солнечная система, обеспечивающая процесс регенерации абсорбента (СКж). НВ (П) – наружный воздух; ОВ – осушенный воздух; В –выбрасываемый в среду воздух для ГРДт и АБР/ИО; N, M – крепкий и слабый растворы абсорбента

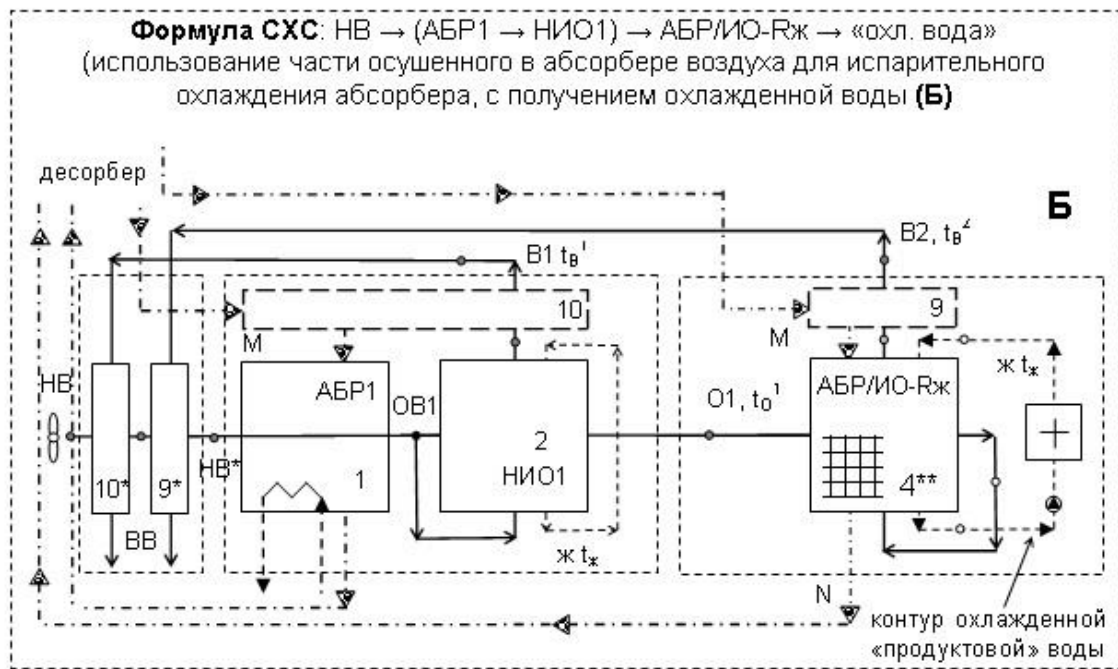
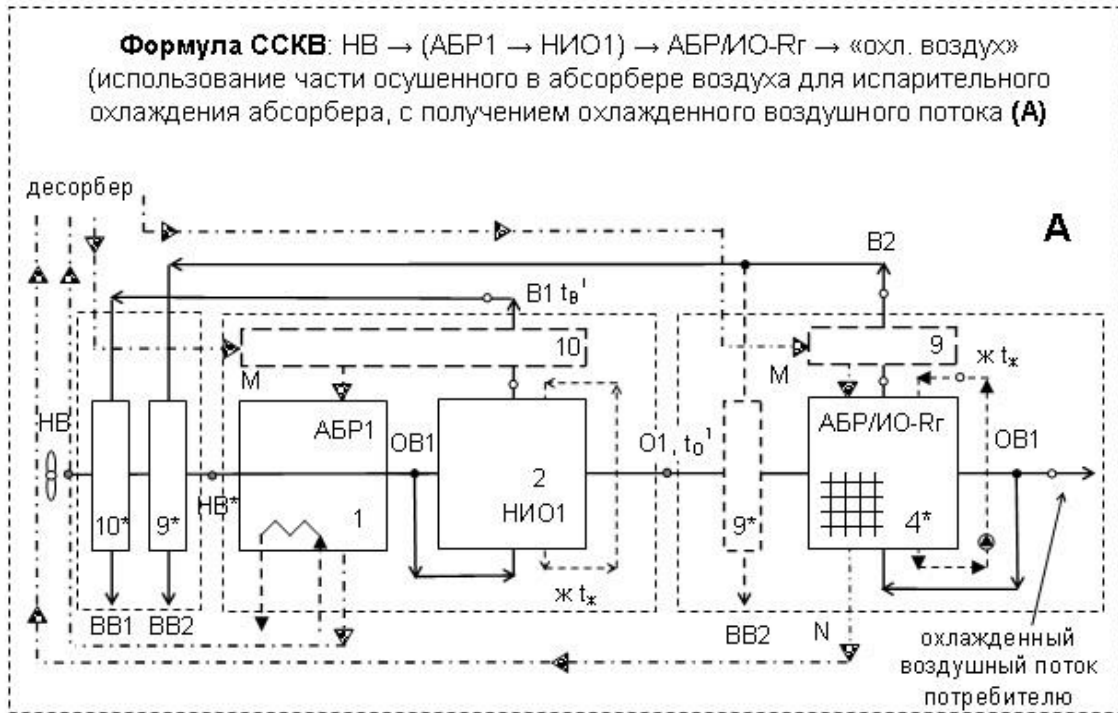


Рис. 2. Принципиальные схемные решения ССКВ и СХС (двухкаскадные схемы) на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением АБР/ИО-Р (формулы АБР1-НИО1 - АБР/ИО-Р).

Обозначения по рис. 1.

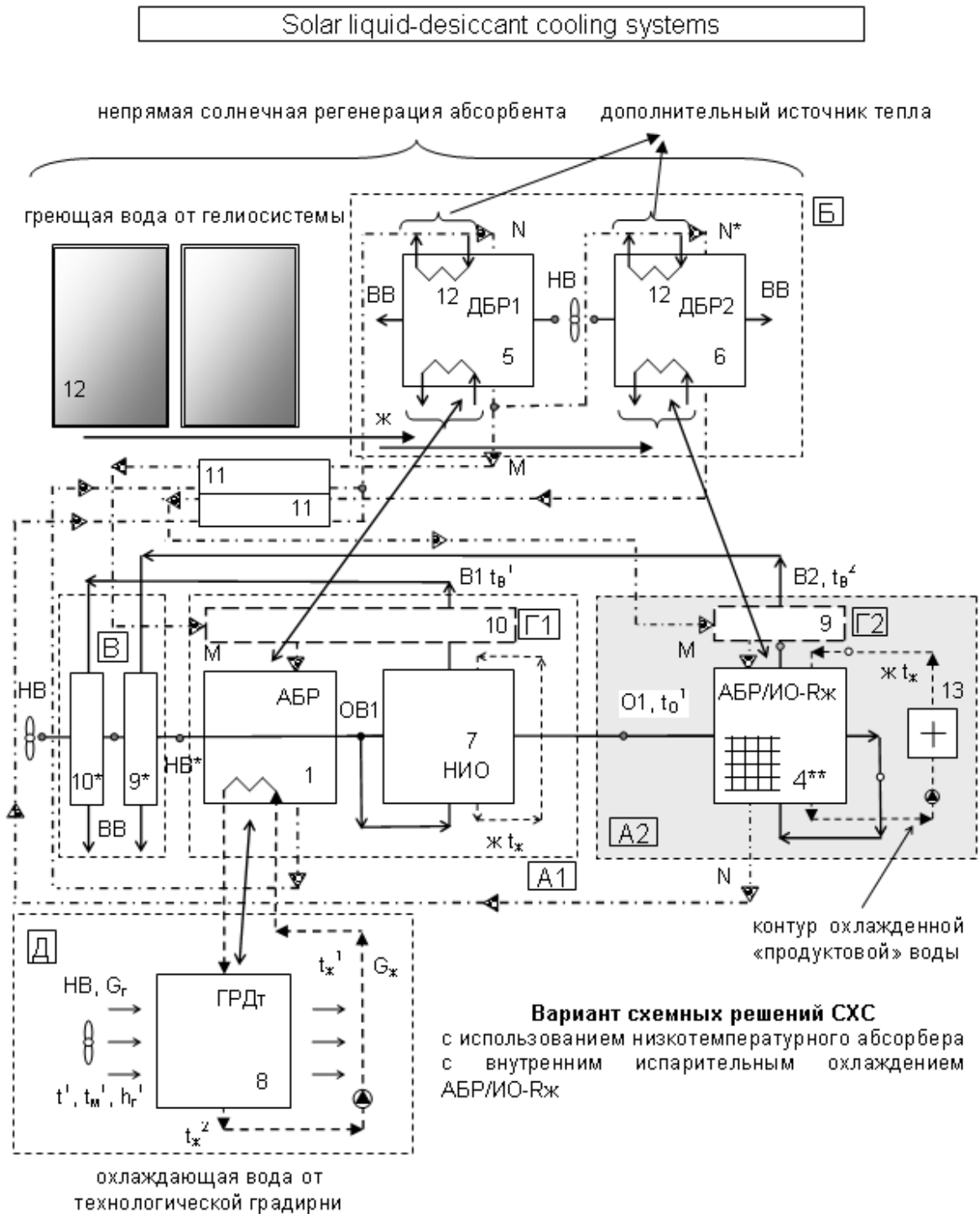


Рис. 3. Принципиальная схема солнечной холодильной системы СХС с использованием абсорбера с внутренним испарительным охлаждением. Формула АБР – НИО (первая ступень) и АБР/ИО-Rж (вторая ступень солнечной системы).

Обозначения по рис. 1

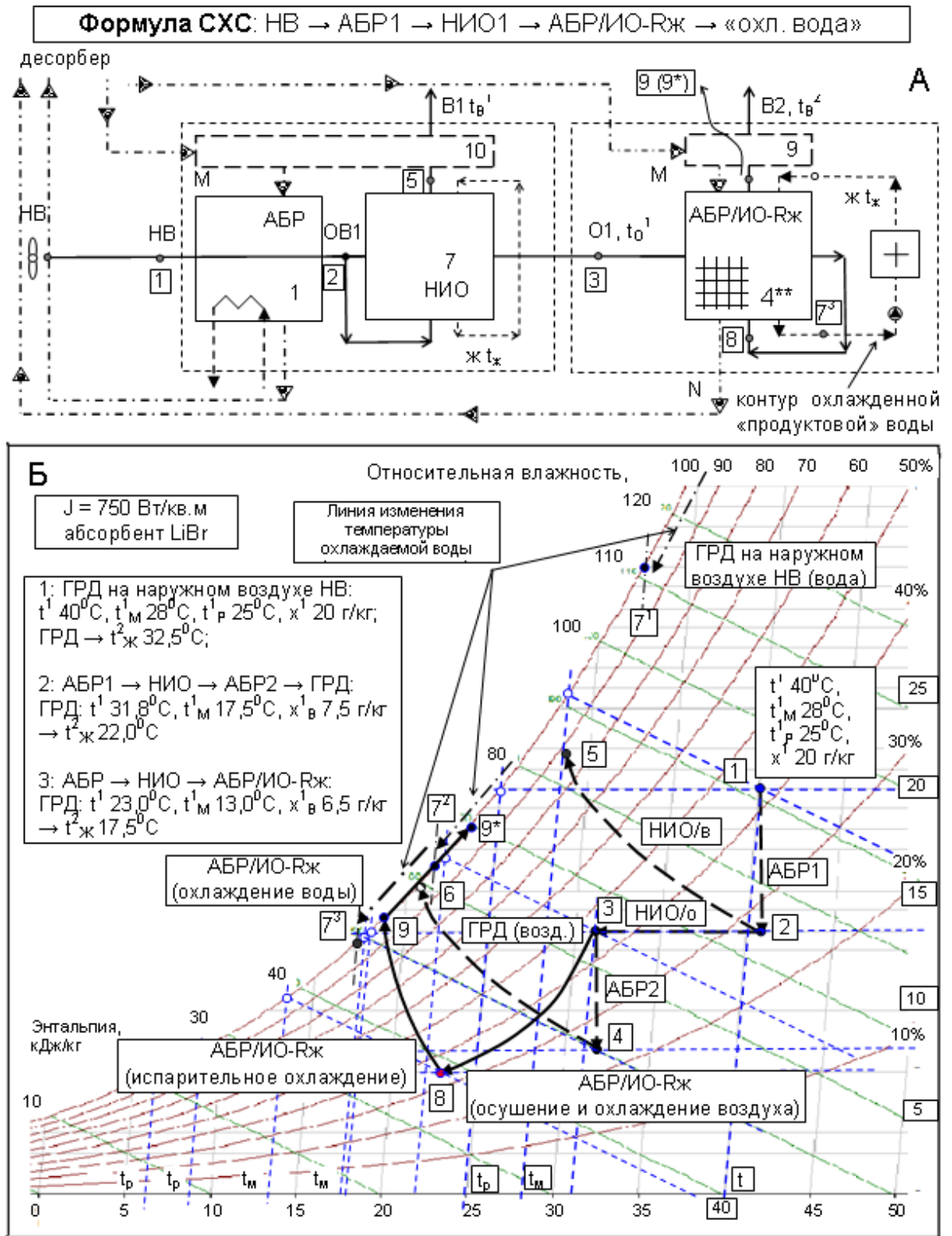


Рис. 4. Принципиальные возможности разработанных СХС по формуле АБР-НИО-АБР/ИО-Рж. Обозначения по рис. 1. Для сравнения приведена СХС по формуле АБР1-НИО1-АБР2-ГРД, где пунктиром показаны: 1-2, 3-4 – процесс осушения воздуха в абсорберах, 2-3, 2-5 – основной и вспомогательный воздушные потоки в НИО; 4-6 – воздух в градирне; 3-8 и 8-9*-9** – процессы осушения воздуха и испарительного охлаждения в АБР/ИО-Рж. Охлажденная вода: $7^1 - t_{ж}^2$ по формуле НВ-ГРД; $7^2 - t_{ж}^2$ по формуле АБР1-НИО-АБР2-ГРД; $7^3 - t_{ж}^2$ по формуле АБР-НИО-АБР/ИО-Рж

абсорбера с внутренним испарительным охлаждением АБР/ИО-Рж обеспечивает более глубокое осушение воздушного потока во второй ступени, и, как следствие, глубокое охлаждение «продуктовой» воды, при этом из схемы может быть устранена градирня традиционного типа. В сравниваемых решениях СХС по формулам [(ДБР1↔АБР1)–НИО] → [(ДБР2↔АБР2)–ГРД] и [(ДБР1↔АБР1)–НИО] → [(ДБР2↔АБР/ИО-Рж)] имеет место опасное приближение выбрасываемого из охладителя воздушного потока к равновесной кривой, или даже выход на нее и дальнейшее следование вдоль кривой насыщения, что неизбежно сказывается на эффективности процесса охлаждения в целом. Анализ реального изменения состояния воздушного потока в испарительных водо- и воздухоохладителях выполнен авторами привлечением метода «энтальпийного потенциала» и соответствующих разработанных ранее методик [2], что позволило выяснить криволинейность этих линий (линии 2-5, 4-6 и 8-9-9* на Н-Т диаграммы влажного воздуха).

Использование схемы АБР/ИО-Рж, вместо блока АБР-ГРД в охладительной части второй ступени охлаждения солнечной системы позволяет снизить энергозатраты и повысить экологическую чистоту новых решений [8]. В равной мере это касается и ССКВ, представленной на рис. 2А, с точки зрения достижения требуемых параметров комфортности воздушной среды [10].

ВЫВОДЫ:

1. Многофункциональные солнечные системы основаны на теплоиспользующем абсорбционном цикле открытого типа и состоят из осушительной (абсорбер-осушитель – десорбер-регенератор) и охладительной части, в составе испарительных охладителей газов и жидкостей; поддержание непрерывности цикла обеспечивает солнечная система на основе жидкостных плоских солнечных коллекторов, в частности, разработанных авторами на основе полимерных материалов;

2. Использование многоступенчатого абсорбера для осушения воздушного потока, как и использование многоступенчатого десорбера для восстановления концентрации абсорбента, обеспечивает рост эффективности процесса абсорбции и существенное снижение пределов последующего испари-

тельного охлаждения сред; например, для солнечной холодильной установки СХС, это позволяет получить охлажденную воду с $t^2_{ж} = 17.50^{\circ}\text{C}$, при параметрах наружного воздуха: $t^1 40^{\circ}\text{C}$, $t^1_{м} 28^{\circ}\text{C}$, $t^1_{р} 25^{\circ}\text{C}$, то есть существенно ниже температуры точки росы;

3. Использование абсорбера с внутренним испарительным охлаждением вместо блока в составе «абсорбер-осушитель и градирня» в охладительной части солнечной холодильной системы позволяет устранить из схемы градирню, снизить габариты и стоимость системы в целом, снизить энергозатраты и повысить экологическую чистоту новых решений.

Литература (References)

- [1] Doroshenko A.V., Glauberman M.A. *Alternative energy [Alternative energy]. Refrigerating and Heating Systems*, [Odessa I.I. Mechnicov National University Press], 2012.
- [2] Doroshenko A. The compact heat and mass transfer equipment for refrigeration (theory, calculation, engineering practice). [Kompaktnaya teplomassoobmennaya apparatura dlia holodilnoy tehniki (teoriya, raschet, ingenernaya praktika). Doctor`s dissertation. 1992. (In Russian)]
- [3] Loycyanskiy L.G. *Mechanics of fluids and gas*. [Mehanika jidkosti i gaza]. Nauka, 1973. (In Russian)
- [4] John I., McNab, Paul McGregor. [Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger]. (2003), *Trudy 21st International Congress of Refrigeration*, doi: IIR/IIF, 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]. (2014), *Trudy International Sorption Heat Pump Conference*.
- [6] Chen G.M., Doroshenko A., Shestopalov K., Khliyeva, O. [Evaporative coolers of water and air for cooling systems. Analysis and perspectives]. (2014), *Trudy 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants*.
- [7] Doroshenko A., Shestopalov K., Khliyeva O. [Development of new schematic solutions and heat and mass transfer equipment for alternative solar liquid desiccant cooling systems]. (2014), *Trudy International Sorption Heat Pump Conference*.
- [8] Koltun P., Doroshenko A., Ramakrishnan S., Kontsov M. [Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternative Air-Conditioning Systems], *Trudy 21st International Congress of Refrigeration*, (2003), pp. 45-57, doi: IIR/IIF, D.C, ICR0140.
- [9] Doroshenko A.V., Antonova A.R., Liudnicky K.V. Solar multistage absorption refrigeration system are based on the heat and mass transfer

devices film`s type. [Solnechnie mnogofuncionalnie absorbcionnie holodilnie systemi na osnove teplomassoobmennih apparatov plenochnogo tipa]. *Holodilnaya tehnika I tehnologiya*, Odessa, 2015, no. 2(51), pp.25-31. (In Russian)

[10] Doroshenko A.V., Liudnicky K.V.
The solar cooling systems are based on evaporative

absorber with internal cooling. [Solnechnie holodilnie systemi na osnove absorbera s vnutrennim isparitelnim ohlajdeniem]. *Holodilnaya tehnika I tehnologiya*, Odessa, 2015, no. 2(51), pp.42-52. (In Russian)

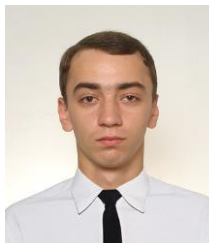
Сведения об авторах:



Дорошенко Александр Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры термодинамики и возобновляемой энергетики ОНАПТ, сфера научных интересов – теплофизика, теплообмен, 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 – теплофизика, теплообмен, математическое моделирование, холодильная техника, альтернативная энергетика.
E-mail: abantonova @ i.ua



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