

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION**



**VII ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2017»**

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017»**

**VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»**

**Конференция баяндамаларының жинағы
15-16 наурыз, 2017 ж.**

**Сборник докладов конференции
15-16 марта 2017 г.**

**Proceedings of the Conference
March 15-16, 2017**

Алматы, 2017

УДК 621.56/59(063)
ББК 31.392
К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией
доктора технических наук, академика **Кулажанова Т.К.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Бараненко А.В., Кантарбаев Р.А.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ.секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. (15-16 марта 2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – 285 с.

ISBN 978-601-263-389-4

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Казахстане, Германии, России, Японии и Украине по следующим направлениям: холодильная техника и компрессоростроение, теплохладоснабжение, системы кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения, экология в холодильной промышленности, холодильная и пищевая технология. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной, пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также на специалистов по системам кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

УДК 621.56/59(063)
ББК 31.392

ISBN 978-601-263-389-4

© АТУ, 2017

СОЛНЕЧНЫЕ МНОГОСТУПЕНЧАТЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. НОВЫЕ РЕШЕНИЯ И АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ

*Дорошенко А.В.¹, доктор тех наук., Антонова А.Р.¹, кандидат тех наук.,
Людницкий К.В.¹, аспирант., Глауберман М.А.¹, кандидат физико-мат. наук
Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина
E-mail: allaantonova62@gmail.com, dor_av@i.ua*

I. Солнечные multifunctional системы. Основные принципы построения

Авторами ранее [1, 5-10] рассматривалось построение солнечных холодильных систем на основе блока [(ДБР $\leftrightarrow$ АБР) – НИО], где предварительное осушение наружного воздуха в абсорбере обеспечивало последующее глубокое охлаждение основного воздушного потока «О» в каналах НИО, либо блока [(ДБР $\leftrightarrow$ АБР) – ГРД], где обеспечивается глубокое охлаждение воды. В настоящей статье представлены разработанные двухступенчатые солнечные холодильные системы СХС (рис. 1А, 3и 6А). Основная концепция создания таких систем основана на следующих положениях:

1. СХС выполнена в двухступенчатом варианте, и состоит из автономных осушительно-охладительных блоков, первый блок решен по формуле [(ДБР $\leftrightarrow$ АБР)–НИО] (в составе элементов 1 и 3), а во втором [(ДБР $\leftrightarrow$ АБР)–ГРД] (элементы 3 и 14), причем каждая ступень регенерации (ДБР, элементы 5 и 6, рис. 3) замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР, элементы 1 и 3), соответственно [7, 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; раствор абсорбента последовательно проходит каждую ступень регенерации, в которую поступает «свежий» наружный воздух;

3. Схема осушительной части может быть построена так, чтобы каждая ступень регенерации (ДБР) была замкнута на соответствующую ступень абсорбера-осушителя воздуха (АБР), рис. 3, 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 (вспомогательный воздушный поток) и ГРД также установлены теплообменники;

5. В охлаждающей части схемы последовательно используется в первой ступени охлаждения воздухоохладитель непрямого типа НИО (2), включенный в схему после соответствующей ступени абсорбции; во второй ступени СХС – градирня ГРД (14).

6. СХС может быть построена с использованием автономных градирен технологического назначения ГРДт для обслуживания абсорберов каждой из ступеней охлаждения, и с использованием части «продуктовой» воды от «продуктовой» градирни ГРДпр (14) для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2 (рис. 6А).

Все теплообменники аппараты (ТМА) солнечных систем конструктивно унифицированы, основаны на использовании аппаратов пленочного типа, и основаны на поперечноточной схеме контактирования потоков газа и жидкости, что обеспечивает: – рост предельных нагрузок по газу, исключаящий, до значений скоростей воздуха 6 - 7 м/сек, возникновение «захлебывания» насадочного слоя и высокую равномерность распределения контактирующих потоков по всему объему насадки [1-2]; – упрощение коммуникаций между ТМА и создание «линейной» схемы построения систем, что снижает энергозатраты на организацию движения теплоносителей.

II. Анализ возможностей солнечных холодильных систем

Анализ принципиальных возможностей разработанных солнечных холодильных систем рассмотрен на примере двухступенчатых СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером, решенных по формуле: (ДБР1 $\leftrightarrow$ АБР1) – НИО – (ДБР1 $\leftrightarrow$ АБР2) – ГРД $\rightarrow$ «охлажденная вода» (рис. 1) и СХС с двумя десорберами, решенных по формуле: (ДБР1 $\leftrightarrow$ АБР1) – НИО – (ДБР2 $\leftrightarrow$ АБР2) – ГРД $\rightarrow$ «охлажденная вода» (рис. 3А). Последний вариант СХС дополнительно рассмотрен с

использованием части «продуктовой» воды от ГРД для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2 (рис. 3Б).

Двухступенчатая (двухкаскадная) СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером. На рис. 2 в поле Н-Т диаграммы влажного воздуха показано протекание процессов в основных элементах солнечных холодильных систем СХС, оформленных по формуле:

$$[(ДБР1 \leftrightarrow АБР1) - НИО] \rightarrow [(ДБР1 \leftrightarrow АБР2) - ГРД]$$

Начальное влагосодержание наружного воздуха выбрано значительно выше критической величины $x^* \approx 12,5 \text{ г/кг}$ [1] ($x = 15$ и 20 г/кг), что требует обязательного предварительного осушения воздуха перед испарительным охлаждением. Анализ выполнен на основе ранее полученных в ОГАХ экспериментальных данных по эффективности процессов в ТМА осушительного и охладительного контуров [1-2, 5-10] на насадке из многоканальных многослойных поликарбонатных плит с параметрами слоя: $d_3 = 15-25 \text{ мм}$. Использование полимерных многоканальных насадочных структур в случае ИО непрямого типа (НИО) не приводит к сколь либо существенному снижению эффективности процесса, поскольку термическое сопротивление разделяющей каналы стенки соизмеримо с термическим сопротивлением жидкостной пленки, стекающей по внутренним поверхностям каналов. Для НИО была принята в расчетах величина эффективности процесса охлаждения по основному и вспомогательному потокам, равная $E_O = E_B = (t^I - t^2)/(t^I - t_M) = 0,65$, при эффективности теплообменников $E_{TO} = 0,8$. Эта величина определяется соотношением расходов воздушных потоков в НИО, $l = G_O/G_B$. Температура воды, рециркулирующей через «мокрую» часть НИО, принята $t_{ж}^* = t_M^I + 1,5-2,5^\circ\text{C}$. На самом деле эффективность охлаждения вспомогательного воздушного потока несколько выше, чем основного, величина E_B несколько выше чем E_O , а реальное значение величины $t_{ж}^*$ зависит от соотношения $l = G_O/G_B$ [1, 2], так что результаты выполненного анализа носят предварительный характер и несколько занижены.

Сравнительный анализ выполнен для начальных параметров наружного воздуха: $t_B^I = 35^\circ\text{C}$, $x_B^I = 15 \text{ г/кг}$ и $t_B^I = 40^\circ\text{C}$, $x_B^I = 20 \text{ г/кг}$, то есть, заведомо, для самых «тяжелых» внешних условий для использования испарительных охладителей сред на Украине и в мире. Для двухступенчатых СХС с одним (единым для двух степеней) десорбером (формула: $(ДБР1 \leftrightarrow АБР1) - НИО1 - (ДБР1 \leftrightarrow АБР2) - ГРД$), получены сравнительные результаты (последовательно по ступеням охлаждения, рис. 1Б) для трех сравниваемых вариантов СХС при двух начальных параметрах НВ:

Параметры наружного воздуха НВ в СХС: $t_B^I 35^\circ\text{C}$, $t_M^I 24^\circ\text{C}$, $t_P^I 20,5^\circ\text{C}$, $x^I 15 \text{ г/кг}$

1: ГРД $\rightarrow t_{ж}^2 29,0^\circ\text{C}$;

2: АБР $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 24,5^\circ\text{C}$;

3: АБР $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 21,0^\circ\text{C}$;

4: АБР1 $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ АБР2 $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 15,0^\circ\text{C}$

Параметры наружного воздуха НВ в СХС: $t_B^I 40^\circ\text{C}$, $t_M^I 28^\circ\text{C}$, $t_P^I 25^\circ\text{C}$, $x^I 20 \text{ г/кг}$

1: ГРД $\rightarrow t_{ж}^2 32,5^\circ\text{C}$;

2: АБР $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 28,5^\circ\text{C}$;

3: АБР $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 26,5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ АБР2 $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t_{ж}^2 21,5^\circ\text{C}$

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

Достигнутый уровень охлаждения воды $t_{ж}^2 = 15,0^\circ\text{C}$ и $21,5^\circ\text{C}$, соответственно, оказывается ниже естественного предела охлаждения по наружному воздуху ($t_M^I 24^\circ\text{C}$ и 28°C) и даже ниже его точки росы ($t_P^I 20,5$ и 25°C). Результаты анализа приведены также на совмещенной диаграмме р-Т для раствора ($\text{LiBr} +$ – влажный воздух), рис. 2 для НВ: $t_B^I = 40^\circ\text{C}$, $x_B^I = 20 \text{ г/кг}$. Здесь показаны процессы изменения состояния раствора абсорбента в абсорберах по ступеням охладителя (7-8, АБР1) и (7-8*, АБР2), в теплообменнике (8(8*)-9 и 10-7) и десорбере-регенераторе (9-10, ДБР). Такой анализ выполнен впервые и позволяет одновременно и наглядно видеть возможности СХС и пути повышения эффективности, особенно при росте концентрации абсорбента

Двухступенчатая (двухкаскадная) СХС с двумя десорберами.

Основной вариант разработанной СХС с двухступенчатым десорбером ДБР приведен на рис. 2-4 по формуле:

$$[(ДБР1 \leftrightarrow АБР1) - НИО] - [(ДБР1 \leftrightarrow АБР2) - ГРД]$$

Оптимально использование двухступенчатого варианта десорбера, когда каждая его ступень обеспечивает последующий рост концентрации абсорбента и связана в работе с соответствующей ступенью абсорбера (рис. 2). На двух последних рисунках в поле Н-Т диаграммы влажного воздуха приведен анализ работы СХС по ступеням охлаждения для двух уровней концентрации абсорбента (ориентировочный предельный уровень концентраций для LiBr++ составляет 70-75% [1]) и НВ: $t^1_{\text{в}} 40^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{м}} 28^\circ\text{C}$, $t^1_{\text{р}} 25^\circ\text{C}$, $x^1 20$ г/кг.

– (ξ^1 60% и 67% на входе в ступени охлаждения, рис. 4):

1: ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 32,5^\circ\text{C}$;

2: АБР $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 28,5,0^\circ\text{C}$;

3: АБР $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 26,5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ АБР2 $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 19,0^\circ\text{C}$

– (ξ^1 69% и 75% на входе в ступени охлаждения, рис. 5):

1: ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 32,5^\circ\text{C}$;

2: АБР $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 25,5,0^\circ\text{C}$;

3: АБР $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 22,5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ АБР2 $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 13,0^\circ\text{C}$

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

Двухступенчатая (двухкаскадная) СХС с двумя десорберами и использованием части «продуктовой» воды от ГРДпр для охлаждения низкотемпературного абсорбера АБР2.

На рис. 6 приведено решение для СХС с использованием части «продуктовой» воды от ГРД для охлаждения низкотемпературного абсорбера второй ступени АБР2. Получено:

1: ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 32,5^\circ\text{C}$;

2: АБР $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 28,5,0^\circ\text{C}$;

3: АБР $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 26,5^\circ\text{C}$;

4: АБР1 $\rightarrow$ НИО $\rightarrow$ АБР2 $\rightarrow$ ГРД: $\rightarrow t^2_{\text{ж}} 15,0^\circ\text{C}$;

Процесс осушения воздуха в низкотемпературном абсорбере АБР2 реализуется при одновременном его охлаждении, причем линия изменения состояния воздушного потока (процесс 3-4) носит криволинейный характер. Линия изменения состояния воздушного потока в градирне также криволинейна и до выхода из насадки ТМА выходит на кривую $\phi = 100\%$, с определенного момента следуя непосредственно по ней (участок 4-6-6*).

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

2. Использование многоступенчатого абсорбера для осушения воздушного потока, как и использование многоступенчатого десорбера для восстановления концентрации абсорбента, обеспечивают рост эффективности процесса абсорбции и существенное снижение пределов последующего испарительного охлаждения сред (газов или жидкостей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтернативная энергетика. Солнечные системы тепло-хладоснабжения: монография /А. В. Дорошенко, М. А. Глауберман. – Одесса: ОНУ, 2012. – 446 с.
2. Дорошенко А. Компактная тепломассообменная аппаратура для холодильной техники (теория, расчет, инженерная практика). Докторская диссертация, Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. Одесса. - 1992. – т. 1. – 350 с., т. 2. – 260 с.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.- «Наука». – 1973. – 848 с.
4. JOHN L., McNAB, PAUL McGREGOR., 2003, Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger. 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0646.
5. Chen, G.M., Zheng, J., Doroshenko, A., Shestopalov, K., 2014a. Design and modeling of a collector-regenerator for solar liquid desiccant cooling system, International Sorption Heat Pump Conference, Washington.
6. Chen, G.M., Doroshenko, A.V., Shestopalov, K.O., Khliyeva, O.Y., 2014b. Evaporative coolers of water and air for cooling systems. Analysis and perspectives, 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Hangzhou.
7. Doroshenko, A., Shestopalov, K., Khliyeva, O., 2014. Development of new schematic solutions and heat and mass transfer equipment for alternative solar liquid desiccant cooling systems, International Sorption Heat Pump Conference, Washington.

8. Koltun, P. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternantive Air-Conditioning Systems. P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0140, 2003. P. 45-57.

9. Дорошенко А.В. Солнечные многоступенчатые абсорбционные холодильные системы на основе теплообменников пленочного типа // А.В. Дорошенко, А.Р. Антонова, К.В. Людницкий/. Холодильная техника и технология. – 2015. – 51(2). – С. 25-31

10. Дорошенко А.В., Людницкий К.В. Солнечные холодильные системы на основе абсорбера с внутренним испарительным охлаждением. // Холодильная техника и технология. – 51 (3) – 2015. – С. 42-52.

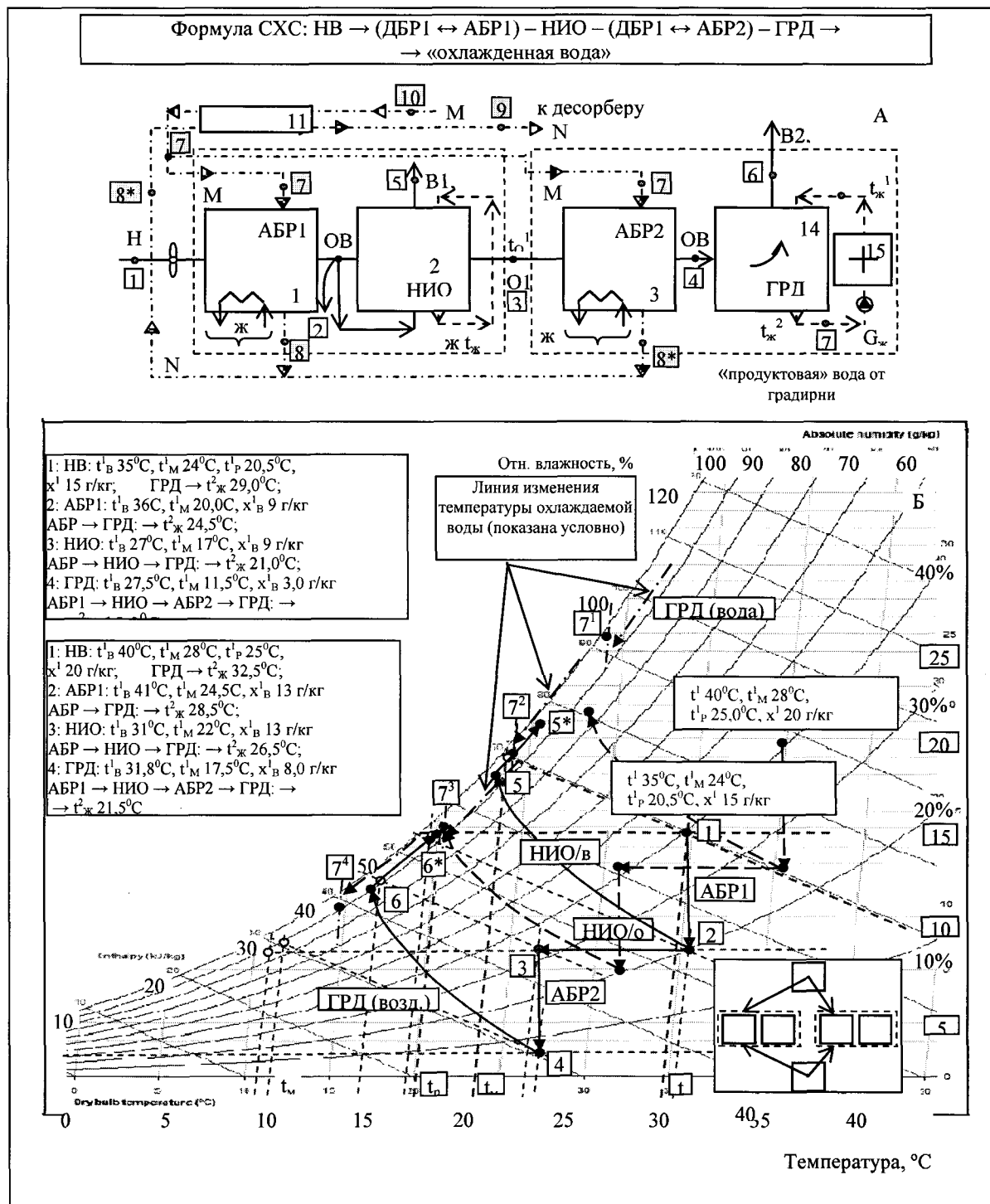


Рисунок 1-. Принципиальные возможности разработанных СХС, (формула по рис. 1А). НВ: $t^{1.1} 35^\circ\text{C}$, $x^{1.1} 15 \text{ г/кг}$ и $t^{1.1} 40^\circ\text{C}$, $x^{1.1} 20 \text{ г/кг}$. Обозначения: 1-2, 3-4 – процесс осушения воздуха в абсорбере; 2-3, 2-5 – основной и вспомогательный воздушные потоки в НИО; $7^1, 7^2, 7^3, 7^4$ – охлажденная в ГРД вода $t_{ж}^{2.1}$ (ГРД, АБР-ГРД, АБР-НИО-ГРД, АБР1-НИО-АБР2-ГРД)

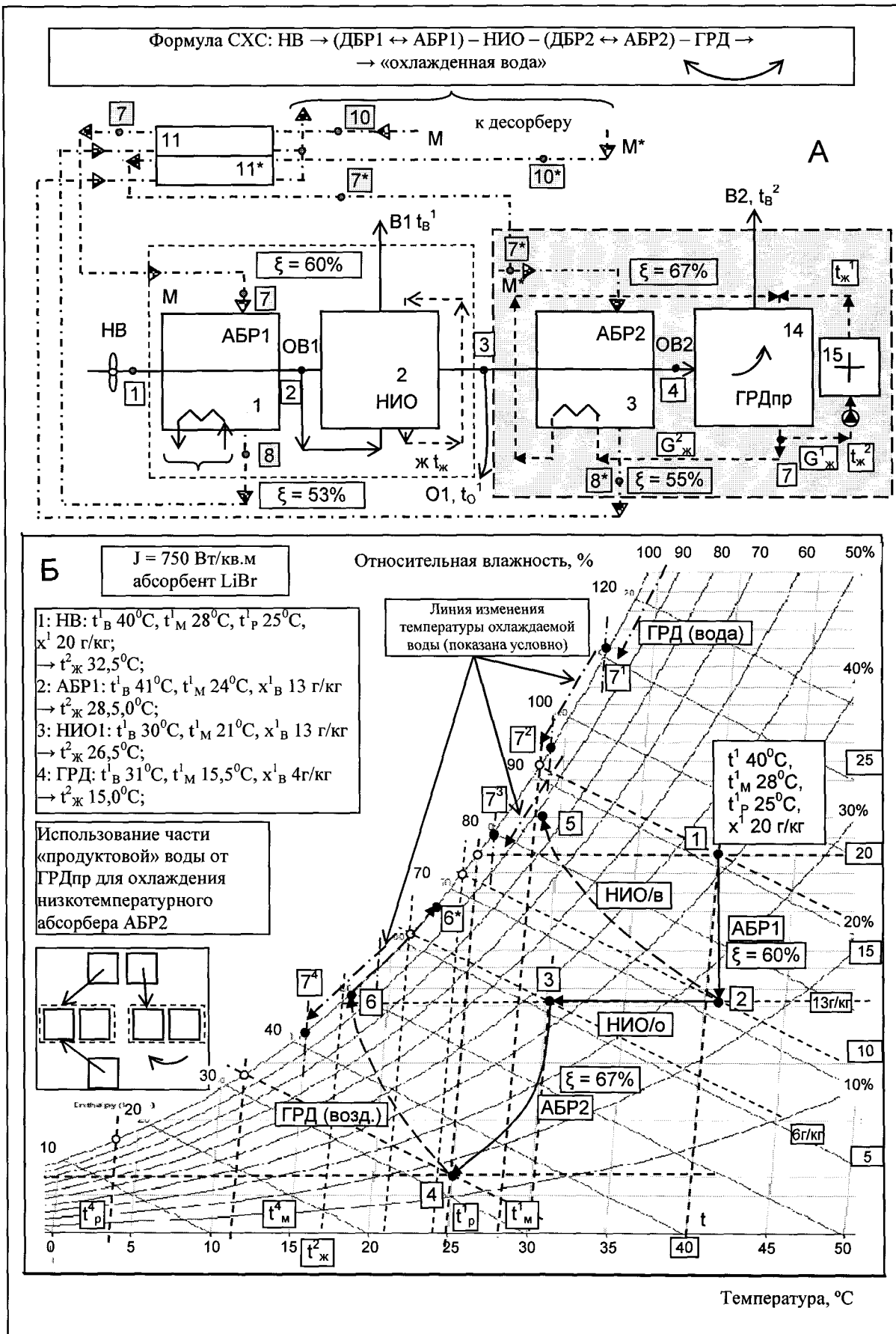


Рисунок 5-. Анализ СХС по формуле (ДБР1 ↔ АБР1) – НИО – (ДБР2 ↔ АБР2) – ГРД (схема на рис. 3.Б)