

УДК 536.248.2:532.529.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В ХОЛОДИЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

Дорошенко А.В., Лисогурская О.А.,

*Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесской национальной академии пищевых технологий,*

Розум М.В.,

Одесский национальный морской университет

Аннотация. Разработана концепция создания многоступенчатых испарительных охладителей газов и жидкостей на основе моноблочных многоканальных полимерных структур. В качестве базовых элементов в них используются охладители непрямого типа в обычном и регенеративном вариантах. Естественным пределом охлаждения в таких системах является точка росы наружного воздуха, что существенно расширяет возможности техники испарительного охлаждения в целом и позволяет решать ряд задач холодильной техники и техники кондиционирования воздуха с существенным снижением энергозатрат на реализацию процессов. Особое внимание уделено решению проблемы реконденсации водяного пара при переходе на многоступенчатые испарительные охладители. Рассмотрена теория совместного тепломасообмена при непрямом испарительном охлаждении. Разработаны принципы конструирования, как отдельных моноблоков, так и многоступенчатых композиций и представлены рекомендации к конструированию нового поколения испарительных охладителей. Выполнен предварительный анализ возможностей таких охладителей применительно к решению задач кондиционирования воздуха.

Ключевые слова: Испарительный охладитель, многоступенчатая схема, моноблок, многоканальная насадка, совместный тепломасообмен, реконденсация.

PERSPECTIVE DE UTILIZARE A RĂCIRII EVAPORATIVE ÎN TEHNICĂ DE REFRIGERARE

Doroşenko A.V., Lisogurskaia O.A.,

*(Institutul de Învăţământ şi de Cercetări de Refrigerare, Criotehnologii şi Ecoenergetică al Academiei
Naţionale de Tehnologii Alimentare din Odesa)*

Rozum M.V.

Universitatea Maritimă Naţională din Odesa

Rezumat. Este elaborat conceptul de creare a răcitoarelor evaporative cu multe trepte ale gazelor şi ale lichizilor pe bază structurilor de tip „monobloc” cu multe canale fabricate din polimer. În calitate de elemente de bază sunt utilizate răcitoarele de tip „indirect” în variantele obişnuite şi regenerative. Limită naturală în sistemele de răcire este punctul de rouă al aerului din exterior, ce lărgeste semnificativ posibilităţile tehnicii de răcire evaporative în întregime şi dă posibilitatea de a rezolva un şir de probleme ale tehnicii frigorifice şi tehnicii de climatizare cu reducerea consumului de energie la realizarea proceselor. Atenţie deosebită este acordată rezolvării problemei recondensării aburului apos la trecere la răcitoarele evaporative cu multe trepte. Este studiată teoria schimbului de căldură comun la răcire evaporativă indirectă. Sunt elaborate principiile de construire ca monoblocurilor separate şi compoziţii cu multe trepte. Sunt prezentate recomandări pentru construire a generaţiei nouă a răcitoarelor evaporative. Este efectuată analiza prealabilă a posibilităţilor a răcitoarelor de acest tip referitor la soluţionarea problemelor de climatizare.

Cuvinte-cheie: Răcitor evaporativ, schemă cu multe trepte, monobloc, duză cu multe canale, chimb de căldură comun, recondensare.

PERSPECTIVES OF USING OF EVAPORATIVE COOLING IN REFRIGERATION ENGINEERING

Doroshenko A.V., Lisohurska O.A.

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

Rozum M.V.

Odessa National Maritime University

Abstract. The concept of creation of multi-stage evaporative coolers of gases and liquids based on multi-channel monoblock polymer structures was developed. The indirect types of coolers in normal and regenerative options are used as the basic elements in them. Natural limit of the cooling in such systems is the dew point of outside air, which significantly enhances the possibilities of the evaporative cooling technology in general, and allows us to solve a number of problems of the refrigeration and air conditioning equipment with a significant reduction of energy consumption for the process. Particular attention is paid to the problem of water vapor recondensation in the transition to multi-stage evaporative coolers. The theory of joint heat and mass transfer in indirect evaporative cooling was examined. The principle of design of individual monoblocks, as well as multi-stage blocks, was developed and recommendations to the design of a new generation of evaporative coolers were made. Preliminary analysis of the possibilities of the evaporative coolers applying to the solution of problems of air conditioning was made.

Keywords: evaporative cooler, multi-stage scheme, monoblock, multichannel nozzle, joint heat and mass transfer, recondensation.

I. Введение

Испарительные охладители газов и жидкостей характеризуются низкими энергозатратами на организацию процесса и существенно более низким антропогенным воздействием на среду обитания [2]. Основной тенденцией в мировой науке и практике является создание испарительных охладителей пленочного типа, как в одноступенчатых, так и в многоступенчатых вариантах. Значительный интерес вызывает охладитель регенеративного типа, обеспечивающий снижение предела охлаждения от температуры по мокрому термометру к температуре точки росы наружного воздуха. Испарительные охладители могут использоваться как в автономном варианте, так и в комбинированных системах, например в составе солнечных осушительно-испарительных охладителей, где предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения сред в холодильных системах и термовлажностную обработку воздуха в системах кондиционирования [2, 8].

II. Одноступенчатые и многоступенчатые испарительные охладители для холодильной техники

Широкое распространение получили испарительные охладители непрямого типа [1-7], представляющие собой, по сути, испарительный охладитель прямого типа, основанный на непосредственном контакте газа и жидкости с введенным внутрь насадочного объема теплообменником для охлаждения продуктового воздушного потока. В испарительном охладителе непрямого типа воздушный поток, поступающий на охлаждение (П) делится на две части (рис. 1). Вспомогательный поток воздуха (В) поступает в «мокрую» часть охладителя, где контактирует с водяной пленкой, стекающей по поверхностям канала (вода рециркулирует через аппарат) и обеспечивает испарительное охлаждение воды, которая, в свою очередь, охлаждает бесконтактно, через разделяющую стенку, основной воздушный поток (О).

Таким образом, продуктовый воздушный поток (О) охлаждается при неизменном влагосодержании, что обеспечивает преимущества при создании на основе испарительных охладителей непрямого типа (НИО) систем кондиционирования воздуха (СКВ) и холодильных систем.

Испарительные охладители НИО могут быть обычного и регенеративного типов [1, 2, 5–7], отличаясь местом разделения полного воздушного потока, поступающего в НИО, на основной, продуктовый, и вспомогательный воздушный потоки.

На рис.1 приведены разработанные решения для моноблоковых испарительных охладителей обычного (рис.1 А, Б) и регенеративного типов (рис.1 В, Г). Для варианта рис.1В, поскольку вспомогательный поток поступает в каналы испарительного охладителя уже предварительно охлажденным, предел охлаждения снижается ниже температуры по мокрому термометру и, в принципе, может определяться величиной температуры точки росы наружного воздуха. Такая схема предпочтительна для глубокого охлаждения сред, но характеризуется и более высоким уровнем энергозатрат. Детальному изучению возможностей охладителя НИО/R посвящено обстоятельное исследование Maisotsenko V. и Lelland Gillan [6,7].

Нами разработана идеология создания многоступенчатых охладителей испарительного типа, включающая следующие положения:

1. Используется модульная (кассетная) схема создания многоступенчатого охладителя на основе идентичных элементов (моноблоков), каждый из которых представляет собой автономную ступень охлаждения, модуль НИО, построенный по той либо иной схеме (рис. 3);

2. Многоступенчатый охладитель включает последовательно установленные ступени (моноблоки) НИО, НИО/R (либо их комбинацию), каждый из которых состоит из системы чередующихся «сухих» и «мокрых» каналов;

3. Между ступенями охлаждения (моноблоками) имеется распределительная камера, где происходит разделение на основной и вспомогательный воздушные потоки; длина распределительных камер в направлении движения основного воздушного потока может уменьшаться (рис. 5 и 6);

4. Соотношение основного и вспомогательного воздушных потоков для каждой ступени охлаждения (моноблока) составляет $l = G_p/G_o = 1/4 - 1/2$ и может варьироваться по длине многоступенчатого охладителя; в соответствии с этим лежит и соотношение площадей сечений «мокрых» и «сухих» каналов в моноблоке $a = f_p/f_o$, при условии равенства скоростей движения основного и вспомогательного воздушных потоков в каналах «сухой» и «мокрой» частей для каждого моноблока;

5. Число ступеней охлаждения (моноблоков) в сборке охладителя определяется требуемым эффектом охлаждения и расчетным долевым расходом получаемого продукта; как правило, число ступеней не превышает трех, поскольку повышение аэродинамического сопротивления многоступенчатого охлаждения возрастает определяющим образом относительно роста ступени охлаждения.

Поскольку вспомогательный поток покидает аппарат достаточно холодным, он может использоваться для предварительного охлаждения полного воздушного потока, поступающего в испарительный охладитель; на выходе вспомогательного воздушного потока из многоступенчатого охладителя может быть установлен теплообменник пластинчатого типа для предварительного охлаждения, поступающего в охладитель наружного воздуха;

На сочетании НИО (НИО/R) и испарительных охладителей прямого типа (воздухоохладителя ПИО и испарительного охладителя воды, градирни, ГРД) по такой модульной схеме могут строиться различные комбинированные варианты охладителей. Это существенно расширяет возможности испарительного охлаждения сред, особенно с учетом предварительного охлаждения воздуха [2].

III. Совместный тепломассоперенос в испарительных охладителях непрямого типа

На рис. 2 (А и Б) показаны схемы течения контактирующих потоков газа и жидкости в НИО и НИО/Р и процессы переноса тепла и массы.

Процессы испарительного охлаждения в НИО описываются системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dt_{ce}}{dx} &= a_1 \cdot (t_{\bar{a}} - t_L) + b_1 \cdot (p - p^*) + c_1 \cdot (t_0 - t_{cb}); \\ \frac{dt_{\bar{a}}}{dx} &= a_2 \cdot (t_{cb} - t_{\bar{a}}); \quad \frac{dp_{\bar{a}}}{dz} = b_2 \cdot (p^* - p_{\bar{a}}); \\ \frac{dt_L}{dz} &= c_2 \cdot (t_{cb} - t_L). \end{aligned} \quad (1)$$

и граничных условий: при $x = 0$; $t_{ce} = t_{ce}^0$; при $z = 0$; $t_E = t_E^0$; $p = p^0$; $t_0 = t_0^0$. Решение этих уравнений, полученное методом конечных разностей, имеет вид:

$$\begin{aligned} t_{cb}^{i+1,k} &= [1 - (a_1 + c_1) \cdot \Delta x] \cdot t_{cb}^{i,k} + (a_1 t_{\bar{a}}^{i,k} - b_1 p^{i,k} + b_1 p^{i,k*} + c_1 t_0^{i,k}) \cdot \Delta x, \\ t_{\bar{a}}^{i,k+1} &= (1 - a_2 \Delta z) \cdot t_{\bar{a}}^{i,k} + a_2 \cdot t_{ce}^{i,k} \cdot \Delta z, \\ p_{\bar{a}}^{i,k+1} &= c_2 \cdot (1 - b_2 \Delta z) \cdot p_{\bar{a}}^{i,k} + b_2 \cdot t_{ce}^{i,k*} \cdot \Delta z, \\ p_i^{i,k+1} &= (1 - c_2 \Delta z) \cdot t_i^{i,k} + c_2 \cdot t_{ce}^{i,k} \cdot \Delta z. \end{aligned} \quad (2)$$

где: i, k – определяющие узловые точки по x и z координатам. Для граничных узловых точек эти уравнения определяют параметры всех потоков в НИО, как для одно-, так и многоступенчатых схем. Система уравнений (1-2) легко трансформируется применительно к процессу в комбинированных испарительных охладителях (для НИО/ПИО, или НИО/ГРД схем). Разработанные математические модели позволяют рассчитать температурные и влажностные параметры (поля) в «сухих» и «мокрых» каналах испарительных охладителей воздуха и оптимизировать охладительный процесс с учетом минимизации энергозатрат на его решение.

IV. Анализ возможностей испарительных охладителей

Анализ возможностей испарительных охладителей (рис. 3) выполнен на основе ранее полученных в ОГАХ экспериментальных данных [1, 2]. При этом эффективность НИО по основному и вспомогательному потокам была принята равной $E_O = E_B = (t^1 - t^2) / (t^1 - t_M) = 0,65$, при эффективности теплообменников $E_{O/i} = 0,8$. Температура воды, рециркулирующей через «мокрую» часть НИО принята $t_{\bar{E}}^* = t_M^1 + 1,5 \dots 2,5^\circ C$. Все тепломассообменные аппараты НИО, входящие в состав рассматриваемых охладителей, пленочного типа с насадкой регулярной структуры, образованной многослойными многоканальными структурами из полимерных, или керамических материалов [1-2]. Поскольку возможности испарительных охладителей рассматривались применительно к задачам СКВ, начальное влагосодержание воздуха выбрано в диапазоне $x_{\bar{A}} < 12,5 \bar{a} / \bar{e} \bar{a}$ и на диаграмме Н/Х (рис. 3) показана область комфортных параметров воздуха, обусловленная сочетанием температуры и относительной влажности воздуха в кондиционируемом помещении (КЗ) [1]. На рис. 3 на Н/Х диаграмме влажного воздуха показаны возможности многоступенчатого испарительного охлаждения для двух вариантов схемной компоновки (А). Здесь показаны процессы: 1-2, 1-3; 2-4, 2-5; 4-6, 4-7 – охлаждения основного воздушного потока и изменения состояния вспомогательного воздушного потока в каждой из трех ступеней охлаждения НИО, соответственно.

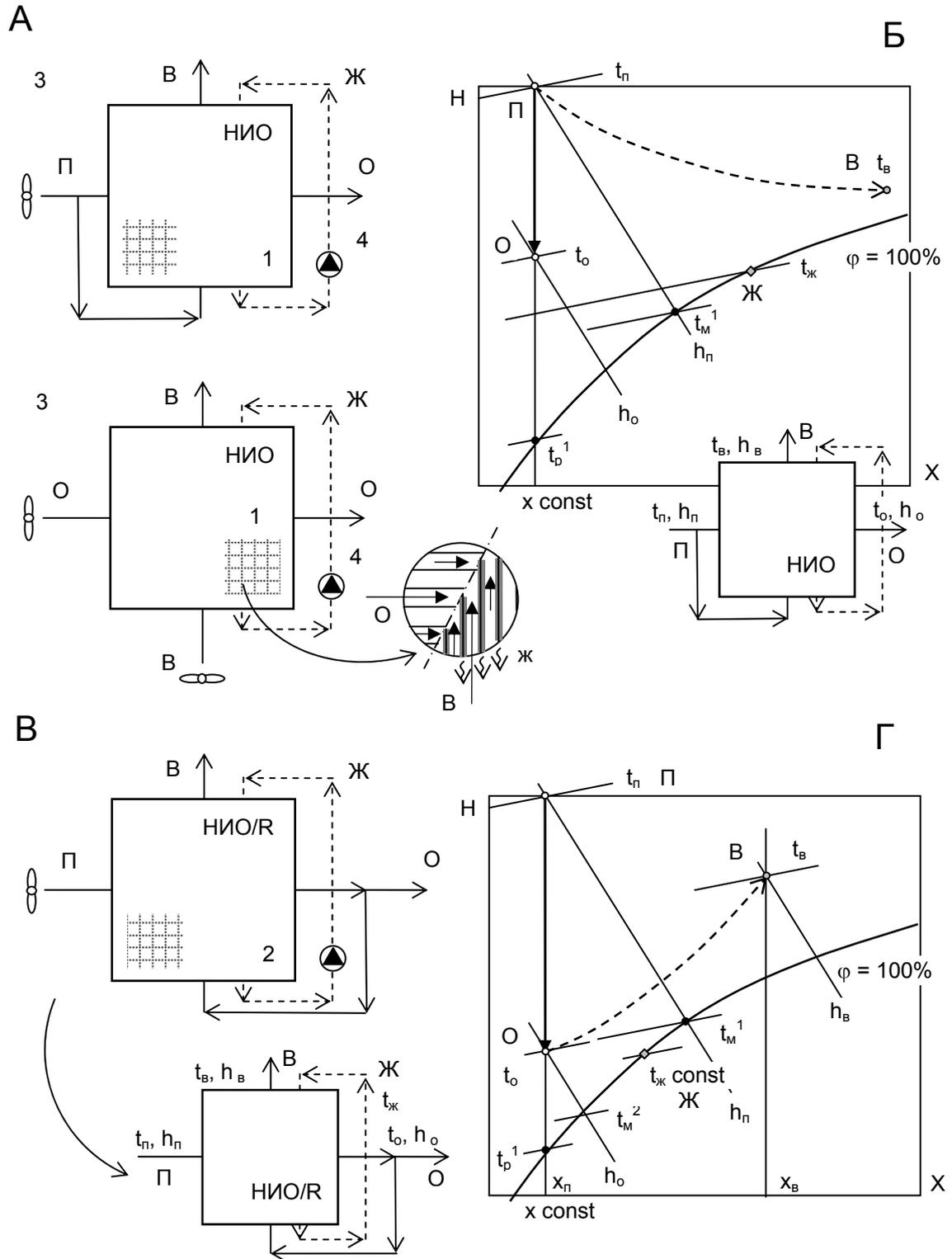


Рис. 1. Принципиальная компоновка моноблокового испарительного охладителя (А) и моноблокового испарительного охладителя регенеративного типа НАО/Р (В) в совмещенном варианте и соответствующий характер протекания процессов на Н-Х диаграмме влажного воздуха (Б, Г).

Обозначения: 1 – испарительный воздухоохладитель непрямого типа НАО; 2 – испарительный воздухоохладитель регенеративного типа НАО/Р; 3 – вентилятор; 4 – водяной насос.

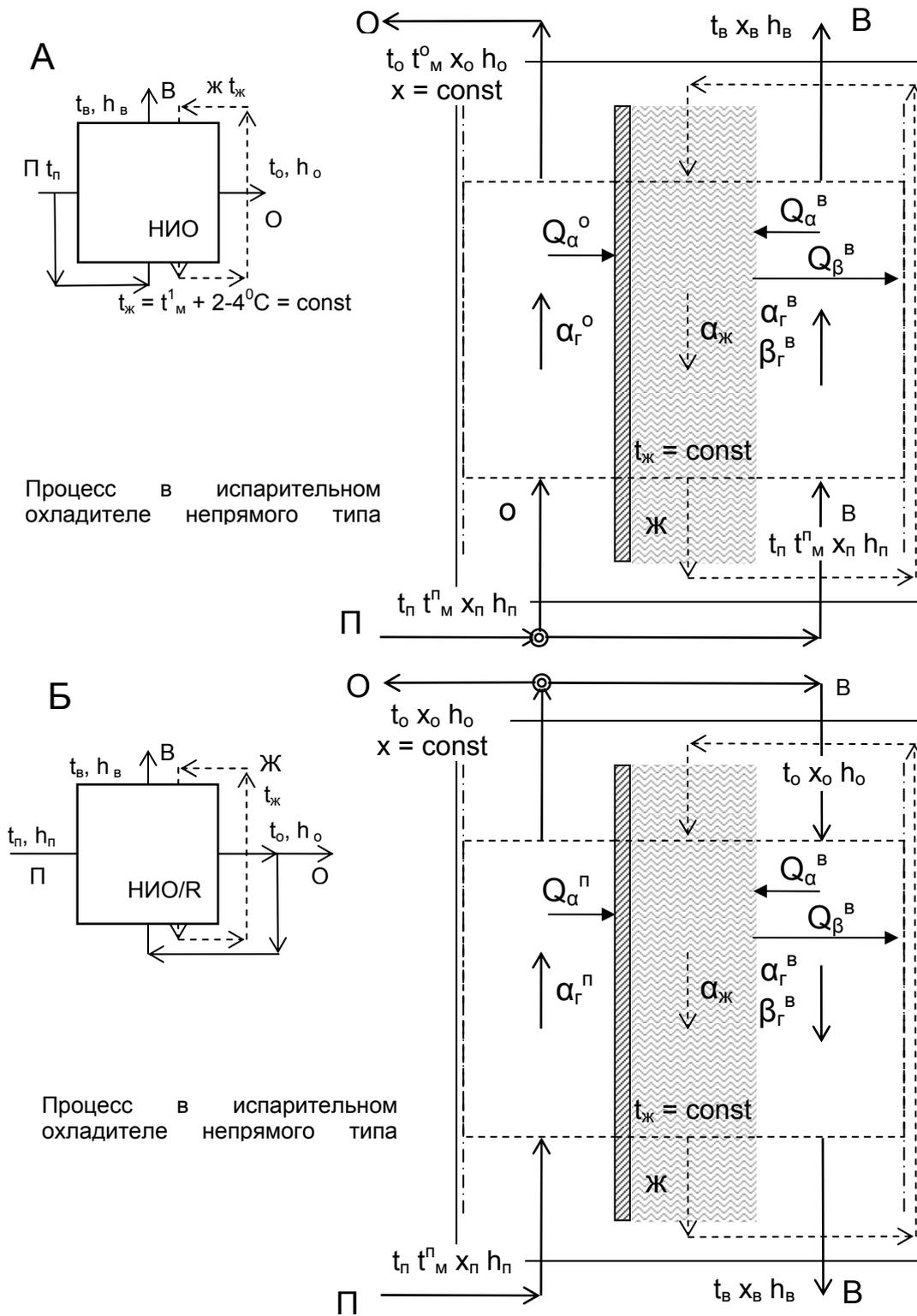


Рис. 2. К моделированию процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении в аппаратах непрямого типа:

- А – процессы в НИО;
- Б – процессы в НИО/Р

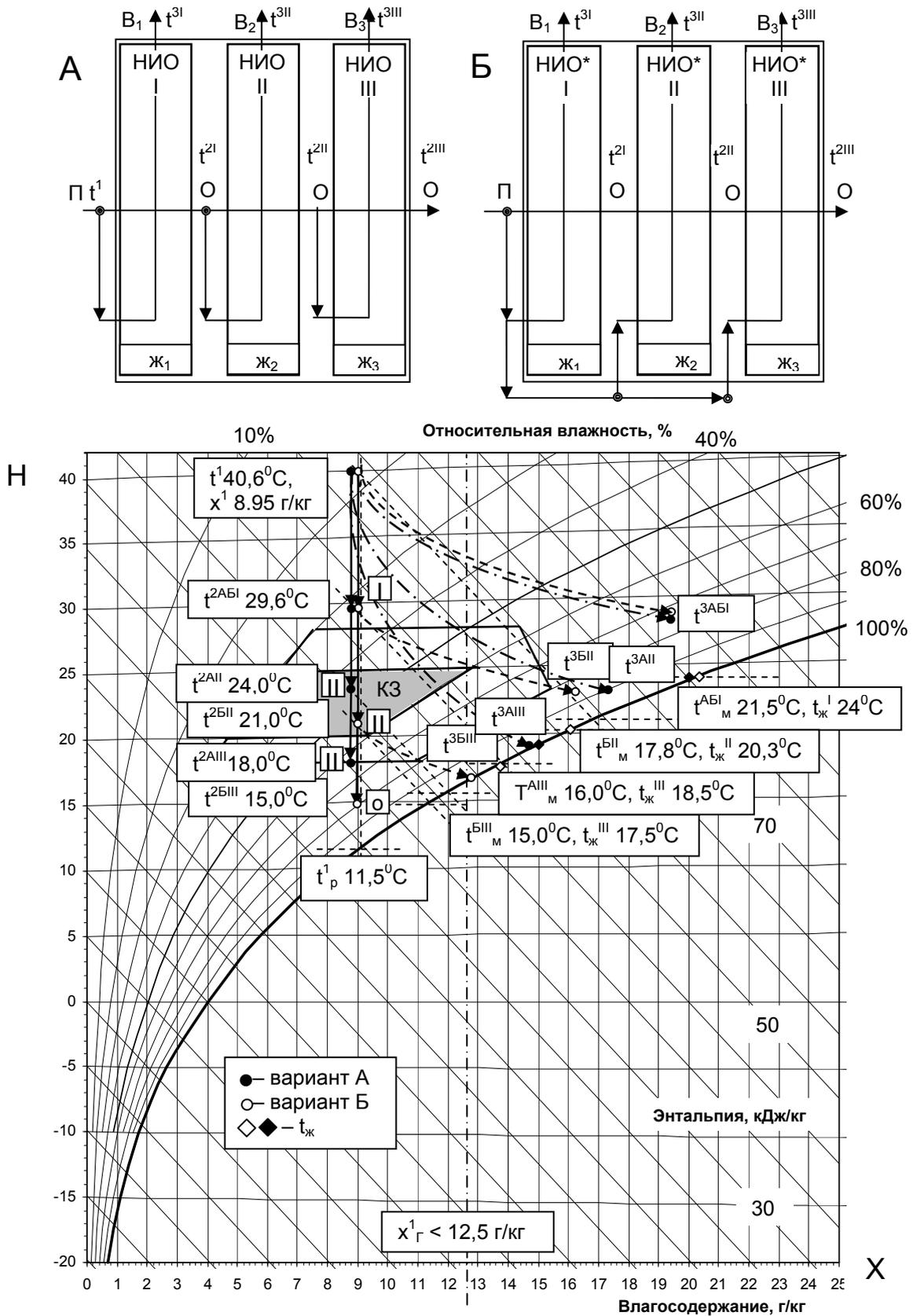


Рис. 3. Принципиальные компоновки моноблочного многоступенчатого испарительного охладителя непрямого типа НИО/НИО/НИО (А и Б) и характер протекания процессов на Н-Х диаграмме влажного воздуха.
 значения: П, О, В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки; I, II, III – и охладителей НИО.

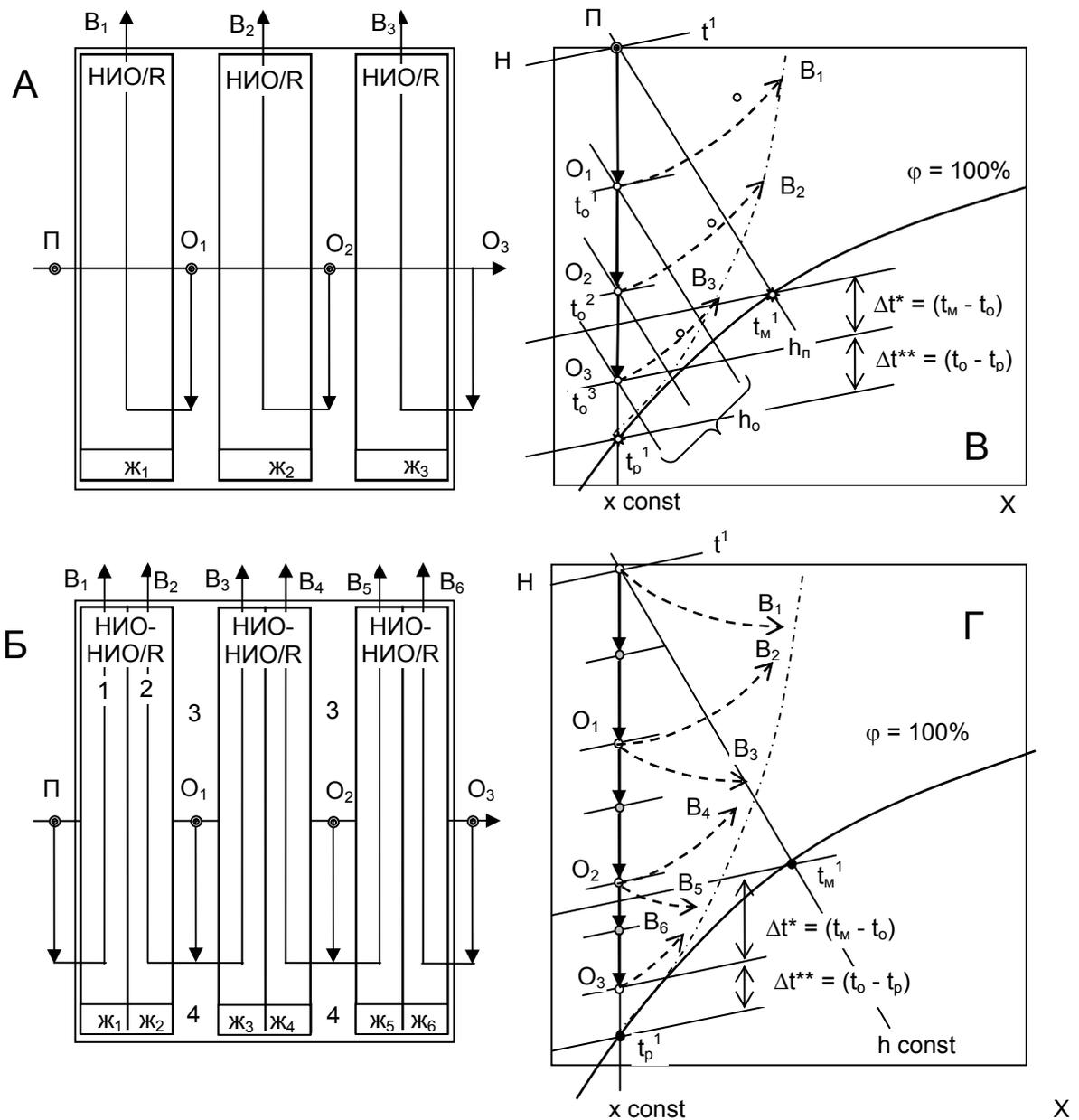


Рис. 4. Принципиальные компоновки моноблочного многоступенчатого испарительного охладителя непрямого типа по формуле НИО/R-НИО/R-НИО/R (А); (НИО-НИО/R)/(НИО-НИО/R)/(НИО-НИО/R) (Б) и характер протекания процессов на Н-Х диаграмме влажного воздуха (В, Г).

Обозначения: 1 – испарительный воздухоохладитель непрямого типа НИО; 2 – испарительный воздухоохладитель регенеративного типа НИО/R; 3 – распределительная камера; 4 – водяная емкость; П, О, В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки.

Основные элементы моноблока испарительного охладителя НИО

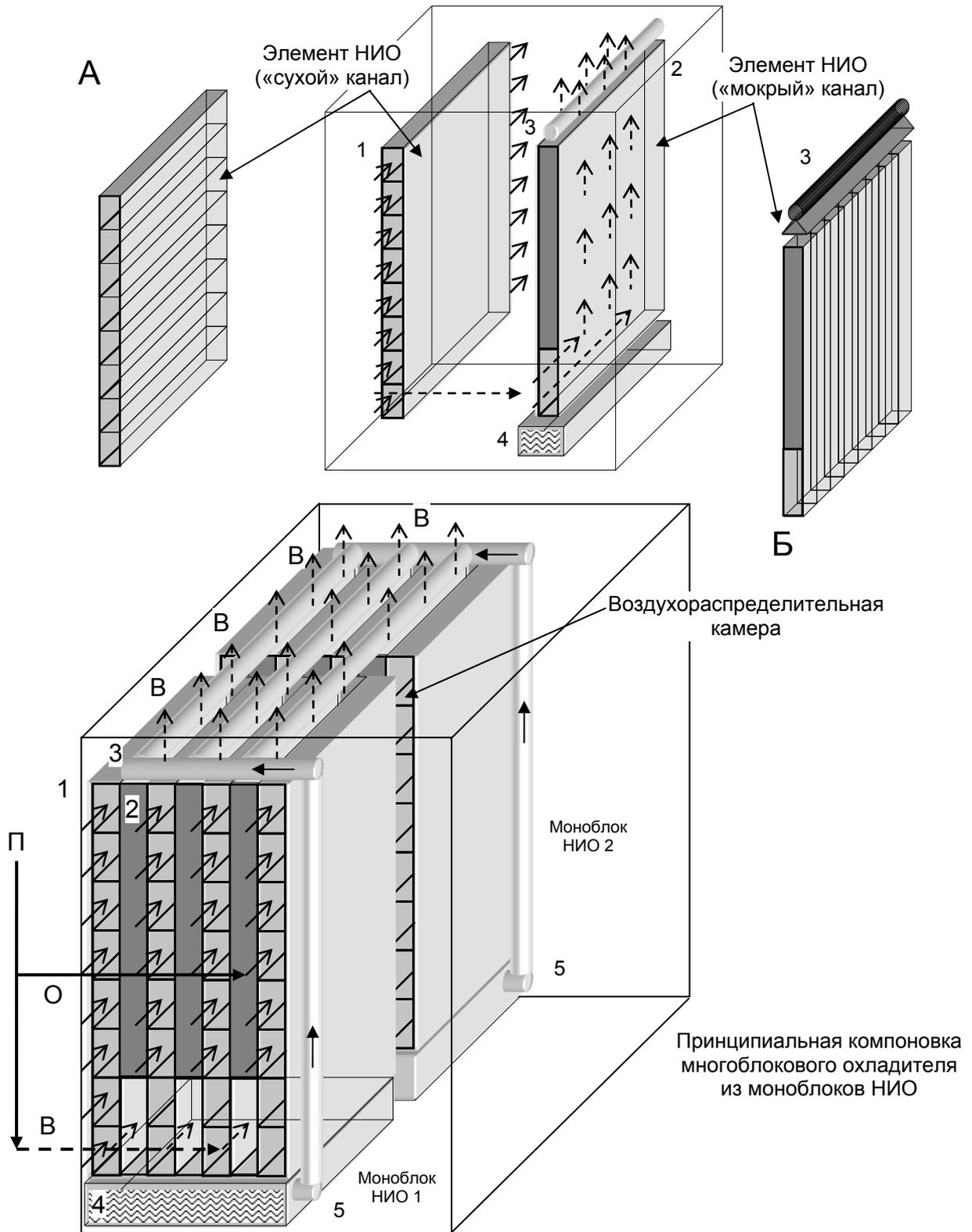
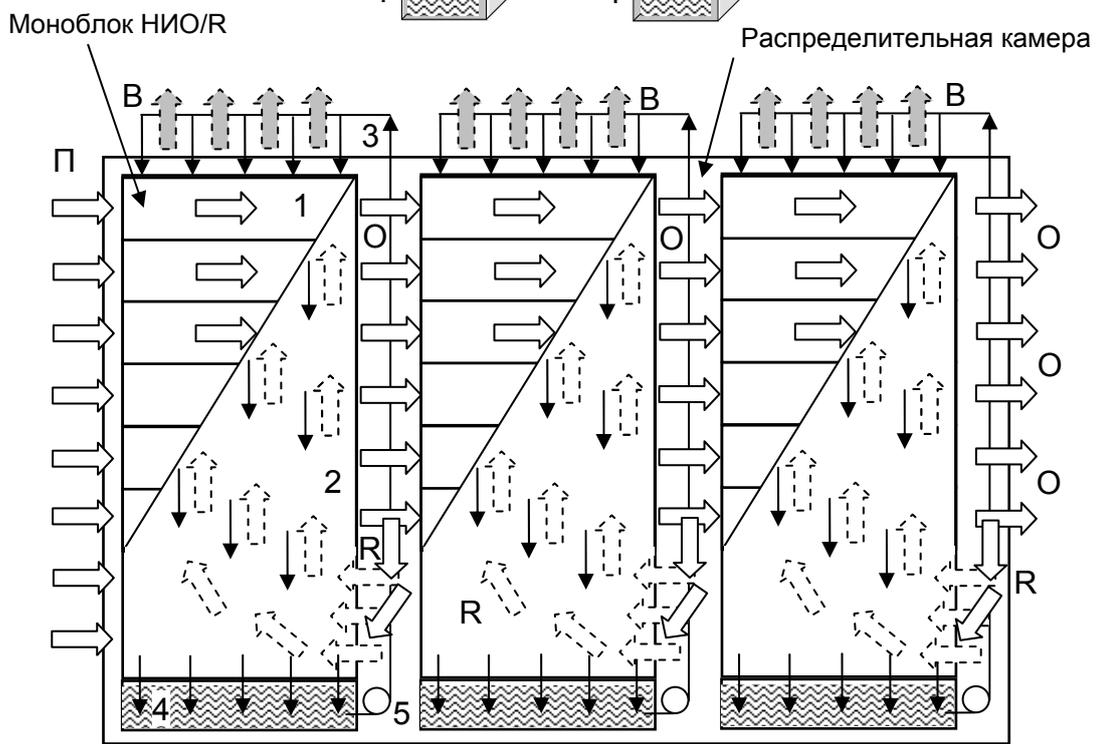
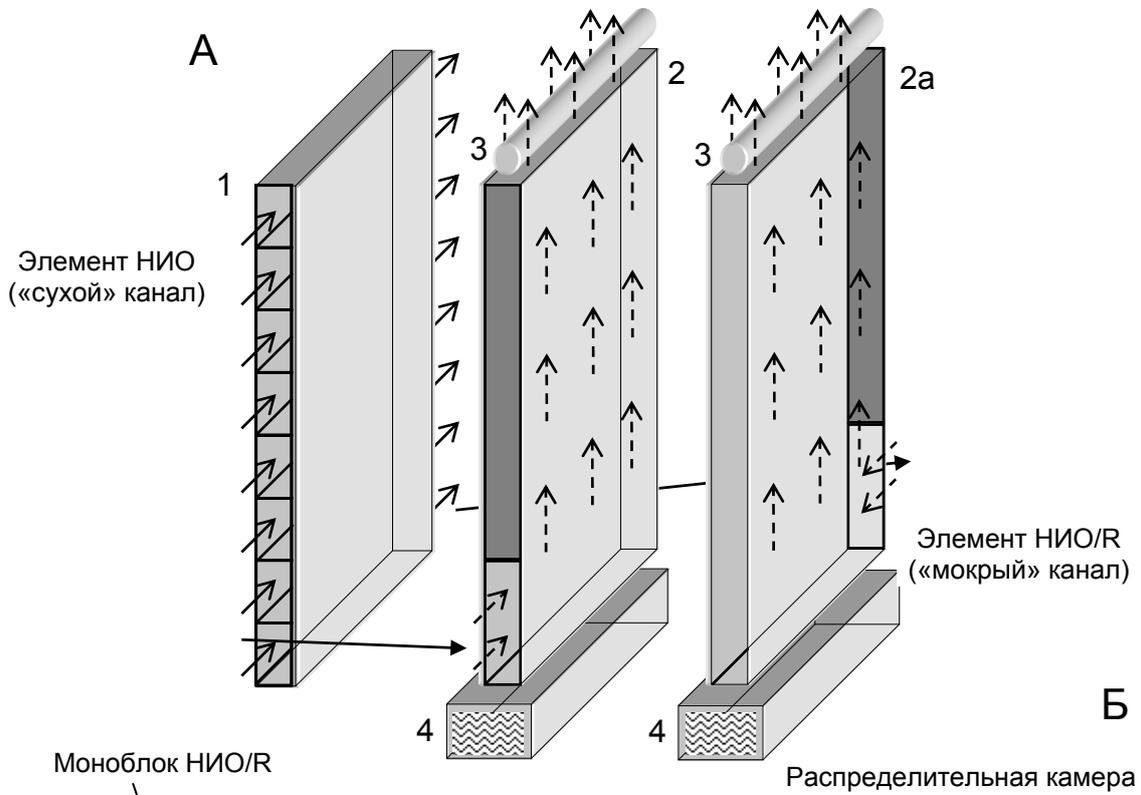


Рис. 5. Основные элементы (А) и принципиальная компоновка многоблочного многоступенчатого испарительного охладителя по формуле НИО/НИО/НИО (Б).

Обозначения: 1 – «сухой» канал; 2 – «мокрый» канал; 3 – водораспределитель; 4 – водосборник; 5 – насос; П, О, В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки.

Основные элементы моноблока испарительного охладителя НИО (НИО/R)



Многоблочный испарительный охладитель регенеративного типа

Рис. 6. Основные элементы (А) и принципиальная компоновка многоблочного многоступенчатого испарительного охладителя регенеративного типа НИО/R (Б)
 Формула сборки блока испарительного охлаждения: (НИО/R-НИО/R-НИО/R)
 Обозначения по рис. 4.

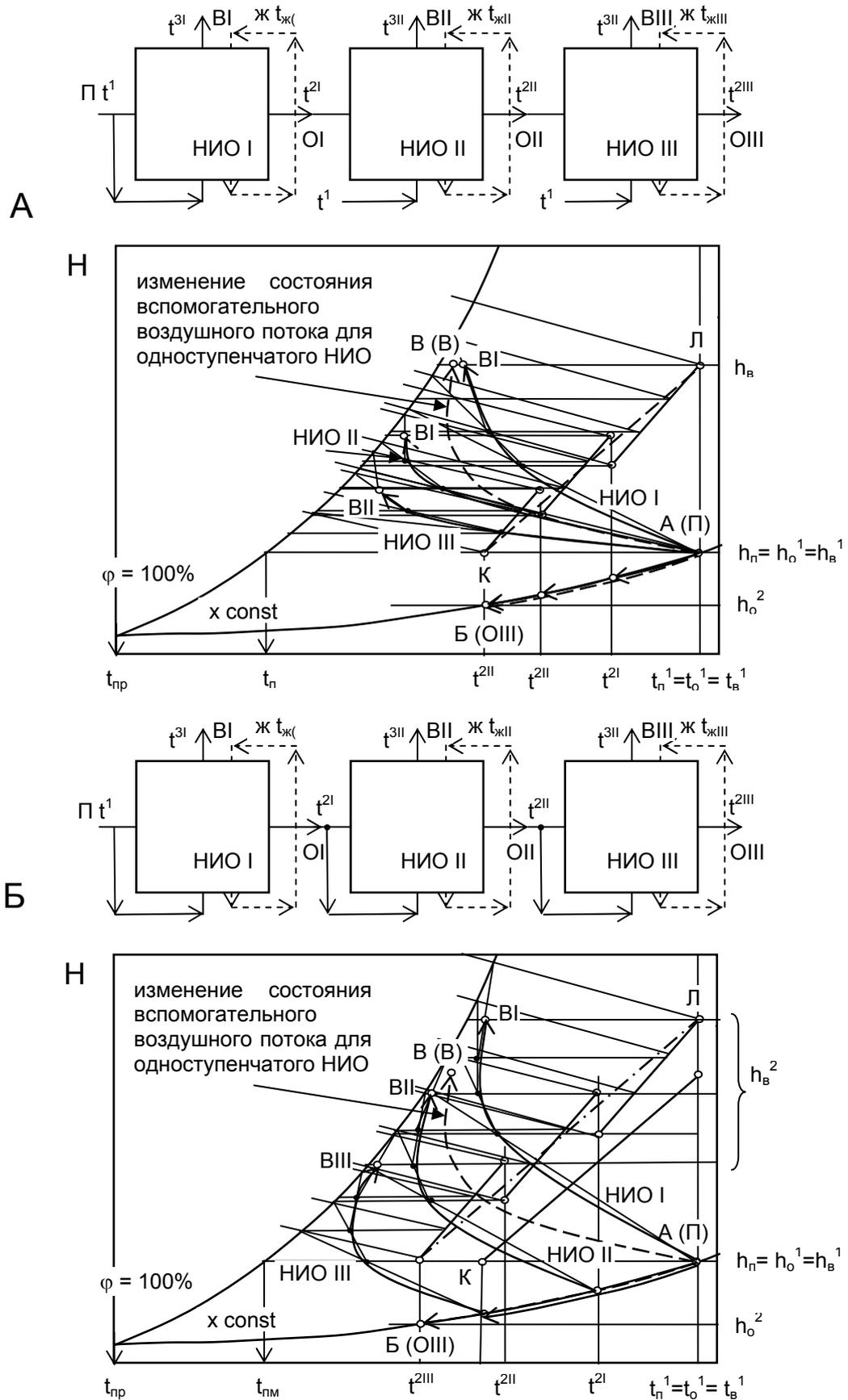


Рис. 7. Возможности многоступенчатых испарительных воздухоохладителей НИО.

Для параметров наружного воздуха $t_1 = 40,6^\circ\text{C}$; $x_1 = 8,95 \tilde{a} / \tilde{e} \tilde{a}$, двухступенчатый охладитель обеспечивает температуру охлажденного воздуха 23°C , то есть достижение параметров комфортности. Трехступенчатый охладитель обеспечивает снижение температуры продуктового воздушного потока ниже значения $t_M^1 = 21,5^\circ\text{C}$, то есть для него пределом охлаждения является точка росы наружного воздуха ($t_p = 11,5^\circ\text{C}$), что существенно расширяет возможности практического использования таких охладителей. Видно, что эффективность охлаждения в каждой последующей ступени многоступенчатого охладителя снижается. Поскольку энергозатраты на движение теплоносителей через очередную ступень охладителя практически не изменяются, количество ступеней многоступенчатого охладителя должно выбираться с точки зрения инженерной оптимизации, как правило, число ступеней не превышает трех.

Как видно из построений на рис. 7 для варианта многоступенчатого охладителя по схеме Б в большей степени выражена и опасность реконденсации, что требует выработки рекомендаций к распределению расходов контактирующих воздушных потоков по ступеням охладителя.

Использование многоступенчатых испарительных охладителей в целях охлаждения сред и термовлажностной обработки воздуха позволяет снизить энергозатраты, в сравнении с традиционной парокомпрессионной техникой охлаждения, в среднем на 25-35% и существенно повысить экологическую чистоту новых решений [1–2, 8].

Нами разработана методология анализа фазовых термических сопротивлений для испарительных охладителей как прямого, так и непрямого типов, в рамках которой была разработана и методология анализа характера изменения состояния воздушного потока, находящегося в непосредственном контакте с водяной пленкой [1].

Как показал выполненный анализ в условиях плотных насадочных структуры высокой эффективности процесса теплообмена воздушный поток может оказываться полностью насыщенным (выходить на кривую насыщения) еще до выхода из аппарата, что грозит опасностью реконденсации и резким падением эффективности процесса.

Выводы:

1. Использование испарительных охладителей в холодильной технике, системах кондиционирования воздуха, криогенной технике, традиционной и альтернативной энергетике обеспечивает для указанных систем как снижение энергозатрат, так и снижение антропогенного воздействия на среду обитания; например, для испарительно-парокомпрессионных систем сравнительно с традиционной парокомпрессионной техникой возможно снижение энергозатрат на 35-40%.
2. Наиболее перспективно создание испарительных охладителей непрямого типа для охлаждения газов и жидкостей, поскольку основной воздушный поток охлаждается при неизменном влагосодержании, а вспомогательный воздушный поток покидает аппарат хоть и увлажненным, но и достаточно холодным, что можно использовать, например, для охлаждения полного воздушного потока на входе в НИО.
3. Переход от схемы НИО к НИО/R позволяет снизить температуру охлаждения; для схемы НИО/R пределом охлаждения является температура точки росы наружного воздуха, что существенно расширяет возможности практического использования испарительных охладителей.

4. Для многоступенчатого охладителя на основе моноблока НИО пределом охлаждения является точка росы наружного воздуха, что существенно расширяет возможности практического использования таких испарительных охладителей; использование в составе охладителя теплообменника на холодном вспомогательном воздушном потоке дополнительно и существенно улучшает его характеристики
5. Разработанная методология для определения состояния вспомогательного воздушного потока в НИО обеспечивает правильный выбор соотношения основного и вспомогательного воздушных потоков предотвращающий опасность реконденсации и резкого снижения эффективности процесса; при значительном интересе в мировой науке и практике к возможностям одно- и многоступенчатых испарительных охладителей такая задача поставлена и решена впервые.

Литература:

- [1] 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.
- [2] Горин А.Н. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика) / А.Н. Горин, А.В. Дорошенко/ – Донецк: Норд-Пресс, 2008. 374 с.
- [3] Foster R.E., Dijkstra E. Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide. International Conference of Applications for Natural Refrigerants' 96, September 3-6, Aarhus, Denmark, IIF/IIR, 1996. - P. 101-109.
- [4] Steimle F. Development in Air-Conditioning. International Conference of Research, Design and Conditioning Equipment in Eastern European Countries, September 10-13, Bucharest, Romania, IIF/IIR. - P. 13-29.
- [5] Stoitchkov N. J., Dimirov G.J. Effectiveness of Crossflow Plate Heat Exchanger for Indirect Evaporative Cooling. Int. J. Refrig., vol. 21, no. 6. – 1998. - P. 463-471.
- [6] Maisotsenko V., Leland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
- [7] Hakan Caliskan, Arif Hepbasli, Ibrahim Dincer, Valeriy Maisotsenko Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: Maisotsenko cycle International Journal of Refrigeration 34 (2011) 980 – 990
- [8] 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.

Сведения об авторах:



Дорошенко Александр Викторович, профессор, доктор технических наук Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: тепломассообмен, гидроаэродинамика, двухфазные потоки, альтернативная энергетика, холодильная и криогенная техника, e-mail: dor_av@i.ua.



Розум Марина Валерьевна, кандидат физико-математических наук, доцент Одесского национального морского университета. Область научных интересов: тепломассообмен, альтернативная энергетика, холодильная техника, e-mail: marina_rozum@ukr.net.



Лисогурская Оксана Александровна, аспирант Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: альтернативная энергетика, холодильная и криогенная техника, e-mail: okslis@ukr.net.