

УДК 621.565
Д 69

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. В. Дорошенко, д-р техн. наук, проф.¹;
К. Б. Жук, ассист.¹;
М. В. Розум, канд. физ-мат. наук, доц.²

¹Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

²Одесский национальный морской университет, г. Одесса

Аннотация. Разработана концепция создания многоступенчатых испарительных охладителей газов и жидкостей на основе моноблочных многоканальных насадочных структур. На основании полученного экспериментального материала выполнен анализ возможностей таких охладителей.

Ключевые слова: испарительный охладитель, многоступенчатая схема, моноблок, насадка, тепломассообмен, реконденсация.

Анотація. Розроблена концепція створення багатоступінчастих випарних охолоджувачів газів і рідин на основі моноблокових багатоканальних насадкових структур. На підставі отриманого експериментального матеріалу виконано аналіз можливостей таких охолоджувачів.

Ключові слова: випарний охолоджувач, багатоступінчаста схема, моноблок, насадка, тепломасообмін, реконденсация.

Abstract. The conception of creating the multi-stage evaporated gas and liquid coolers on the basis of monoblock multichannel structures is developed. On the basis of the received experimental material the possibility analysis of such coolers is carried out.

Keywords: evaporated cooler, multi-stage chart, monoblock, heat-mass-change, recondensation.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Сопряженные проблемы энергетики и экологии интенсифицируют поиск альтернативных решений в области холодильных и кондиционирующих систем [3]. Эффективность испарительного охлаждения сред ограничена климатическими условиями, тем не менее, интерес к возможностям испарительных охладителей как прямого, так и непрямого типа в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой. 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 [1, 4].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ – анализ эффективности холодильных и кондиционирующих систем испарительного охлаждения сред и определение рациональных принципов охлаждения.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

В испарительном охладителе непрямого типа, получившем наибольшее распространение в последние годы [1–3, 5–8], воздушный поток (П), поступа-

ющий на охлаждение, делится на две части (рис. 1). На рис. 1 изображена принципиальная компоновка моноблокового испарительного охладителя НИО (Indirect Evaporative Cooler IEC) (А) и моноблокового испарительного охладителя регенеративного типа НИО/Р (IEC/R), (Б), а также соответствующий характер протекания процессов на Н-Х диаграмме влажного воздуха (Б, В).

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). Этот поток воздуха охлаждается при неизменном влагосодержании, что обеспечивает преимущества при создании на основе НИО холодильных систем и систем кондиционирования воздуха СКВ. Вспомогательный воздушный поток выносит все тепло из аппарата в «связанном» виде, его температура также понижается и влагосодержание возрастает. Температура воды в цикле сохраняет неизменное значение и оказывается на несколько градусов выше температуры мокрого термометра поступающего в НИО наружного воздуха. Эта температура зависит от соотношения воздушных потоков в НИО (основного и вспомогательного), и является пределом охлаждения для обоих воздушных потоков.

Испарительные охладители НИО могут быть обычного и регенеративного типов, отличаясь местом разделения полного воздушного потока, поступающего в НИО, на основной, продуктовый и вспомогательный воздушные потоки (см. рис. 1, *a* – НИО и *б* – НИО/R). В случае *б* обеспечивается более глубокое охлаждение воздуха, поскольку здесь процесс испарительного охлаждения воды в «мокрой» части аппарата ориентирован на температуру мокрого термометра воздуха, уже прошедшего сухое охлаждение в «сухой» части охладителя, и реальным пределом охлаждения является температура точки росы наружного воздуха. Такая схема предпочтительна для глубокого охлаждения сред, но характеризуется и более высоким уровнем энергозатрат. Естественный предел

испарительного охлаждения для таких решений значительно понижается, и, если в традиционном варианте это температура мокрого термометра наружного (поступающего в аппарат) воздуха, то для новых решений пределом охлаждения является температура точки росы. Детальному изучению возможностей охладителя НИО/R посвящены обстоятельные исследования [5, 6, 9].

Авторами данной статьи, на основании многолетних исследований испарительных охладителей газов и жидкостей, разработана идеология создания многоступенчатых охладителей испарительного типа, включающая следующие положения:

1. Используется модульная (кассетная) схема создания многоступенчатого охладителя на основе

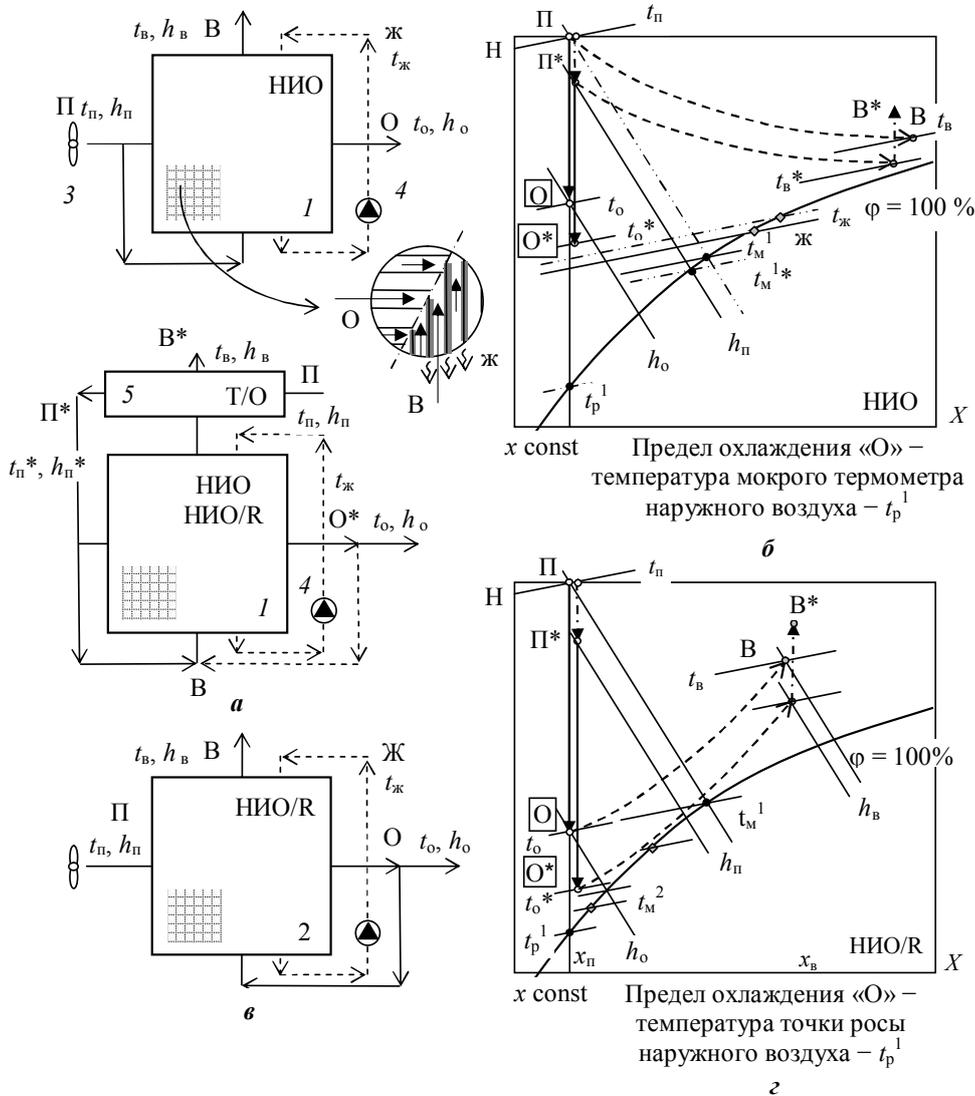


Рис. 1. Компонка моноблоковых охладителей типа НИО и НИО/R: 1 – испарительный воздухоохладитель прямого типа НИО; 2 – испарительный воздухоохладитель регенеративного типа НИО/R; 3 – вентилятор; 4 – водяной насос; 5 – теплообменник

идентичных элементов (моноблоков), каждый из которых представляет собой автономную ступень охлаждения, модуль НИО, построенный по той либо иной схеме (рис. 2 и 3). Формула сборки блока испарительного охлаждения: НИО/R-НИО/R-НИО/R;

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. Размеры каналов в моноблоке, в «сухой» и «мокрой» частях, идентичны (форма каналов и величина эквивалентного диаметра каналов) и могут уменьшаться в направлении движения основного воздушного потока; форма каналов каждой ступени (моноблока) любая; рекомендуемые размеры каналов (величина эквивалентного диаметра каналов) составляют диапазон $d_3 = 10 \dots 20$ мм [2];

4. Между ступенями охлаждения (моноблоками) имеется распределительная камера, где происходит разделение

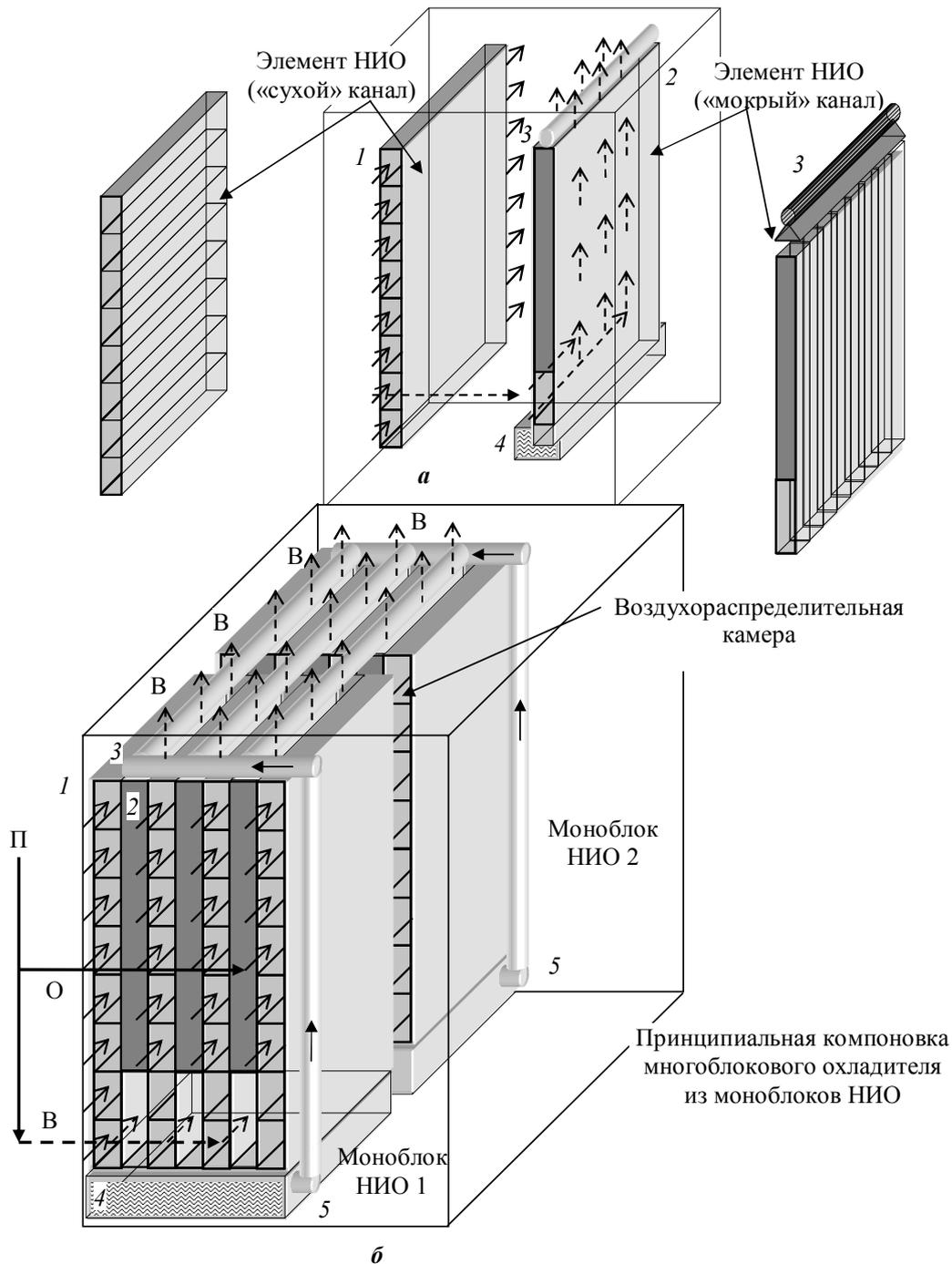


Рис. 2. Основные элементы (а) и принципиальная компоновка многоблокового многоступенчатого испарительного охладителя регенеративного типа НИО/R (б)

на основной и вспомогательный воздушные потоки; длина распределительных камер в направлении движения основного воздушного потока может уменьшаться;

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

6. Каждая ступень охлаждения (моноблок) имеет автономную емкость для жидкости;

7. Число ступеней охлаждения (моноблоков) в сборке охладителя определяется требуемым эффектом охлаждения и расчетным долевым расходом получаемого продукта;

8. Регулирование соотношения расходов основного (продуктового) и вспомогательного потоков осуществляется на выходе из многоступенчатого охладителя по основному (продуктовому) потоку воздуха (по расходу и термовлажностным параметрам).

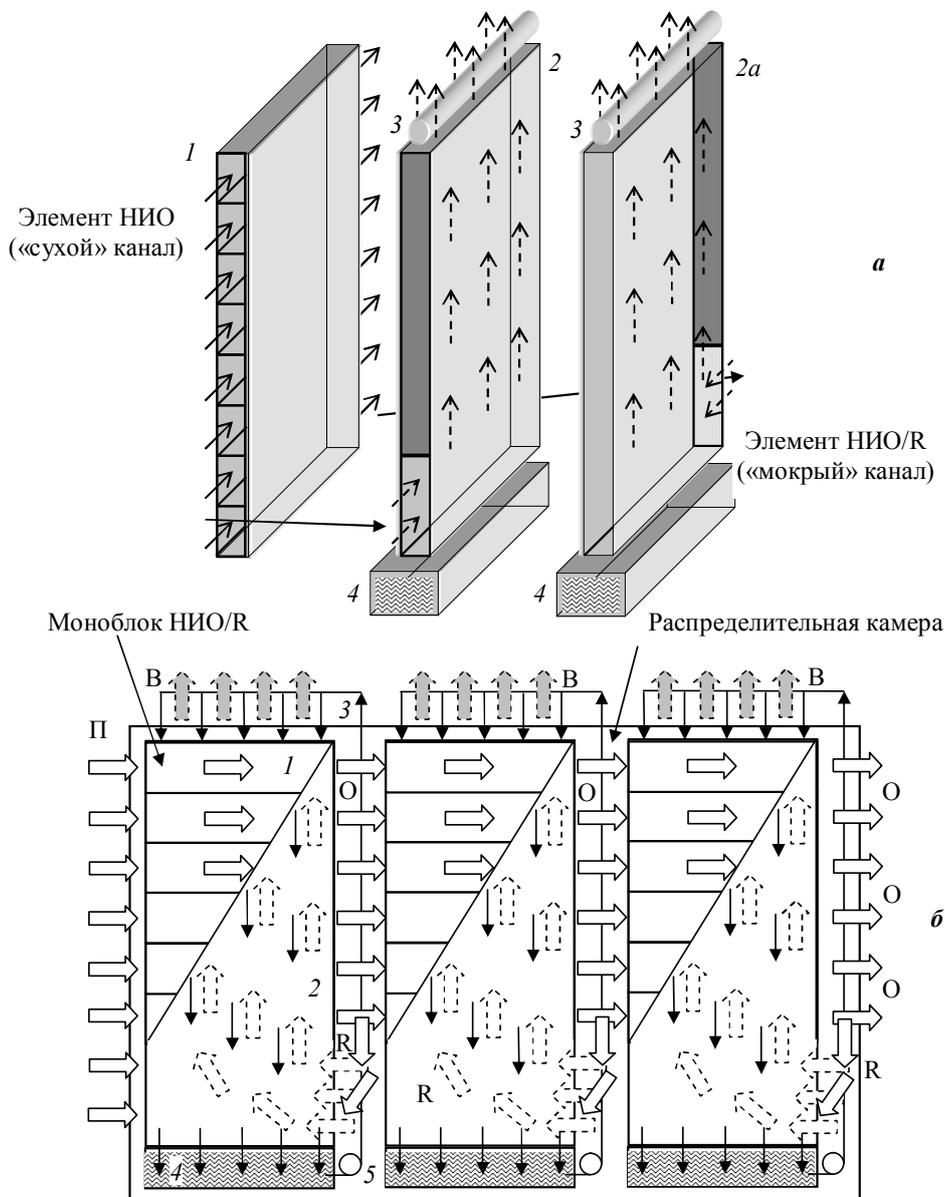


Рис. 3. Основные элементы (а) и принципиальная компоновка многоблокового многоступенчатого испарительного охладителя по формуле НИО/НИО/НИО (б): 1 – «сухой» канал; 2 – «мокрой» канал; 3 – водораспределитель; 4 – водосборник; 5 – насос; П, О, В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки

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, как это показано на рис. 1 для вариантов НИО и НИО/Р [3].

На рис. 4 (а и б) показаны схемы контактирующих потоков газа и жидкости в НИО и НИО/Р и процес-

сы переноса тепла и массы. Математическая модель процессов испарительного охлаждения в испарительном охладителе прямого типа (например, в градирне, ГРД) представляется системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{dt_{\text{ж}}}{dx} = a_1 \cdot (t_{\text{г}} - t_{\text{ж}}) + b_1 \cdot (p_{\text{г}} - p^*); \\ \frac{dt_{\text{г}}}{dz} = a_2 \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{г}}); \quad \frac{dp_{\text{г}}}{dz} = b_2 \cdot (p^* - p_{\text{г}}) \end{cases} \quad (1)$$

и граничных условий: при $x = 0$, $t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}}^0$; при $z = 0$, $t_{\text{г}} = t_{\text{г}}^0$, $p = p_{\text{г}}^0$. Краевая задача решается методом

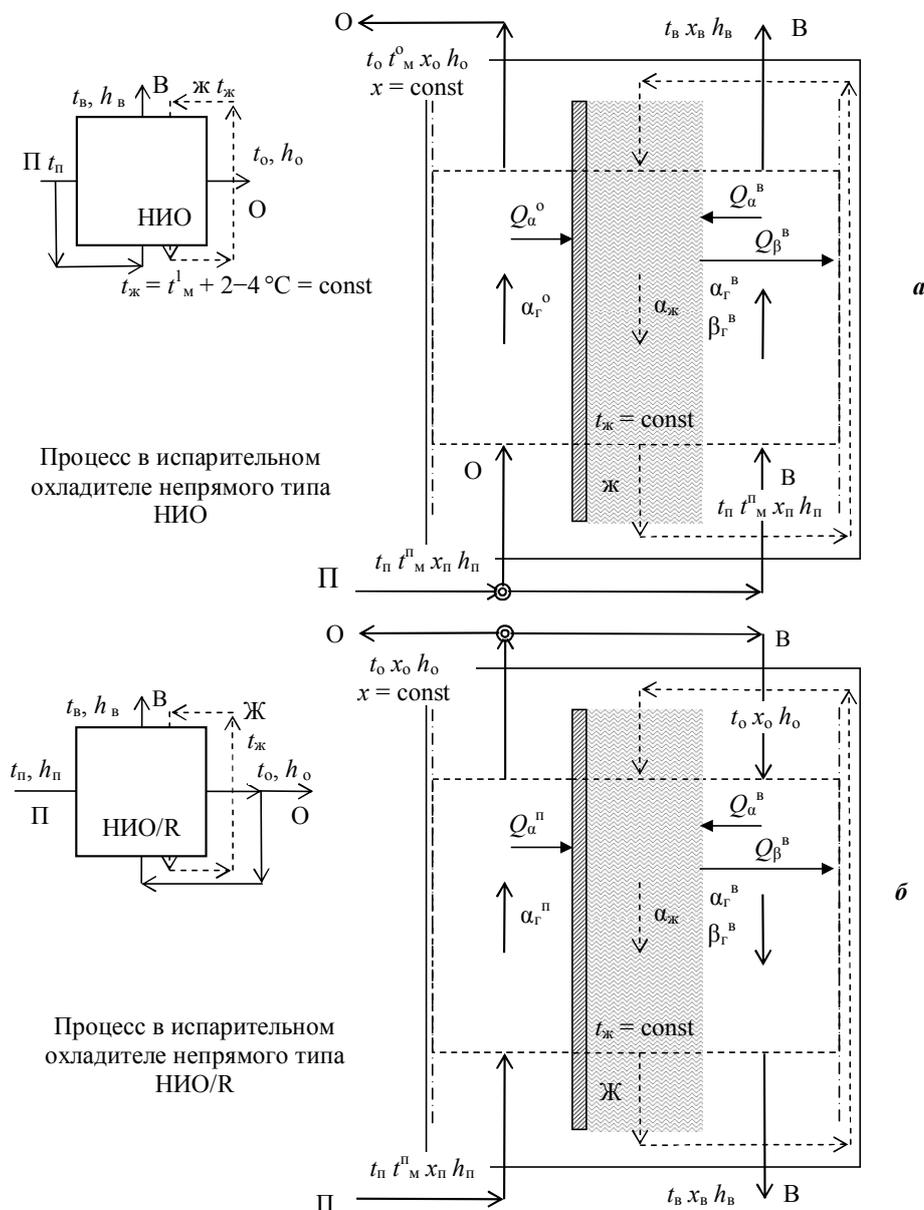


Рис. 4. К моделированию процессов совместного тепломассообмена при испарительном охлаждении в аппаратах непрямого типа: а – процессы в НИО (ИЕС); б – процессы в НИО/Р (ИЕС/Р)

конечных разностей и уравнения (1) аппроксимируются разностной схемой:

$$\begin{cases} t_{\text{ж}}^{i+1,k} = [1 - a_1 \cdot \Delta x \cdot t_{\text{ж}}^{i,k}] + a_1 \cdot \Delta x \cdot t_{\text{г}}^{i,k} + \\ + b_1 \cdot \Delta x \cdot p_i^{i,k} - b_1 \cdot \Delta x \cdot p^*(t_{\text{г}}^{i,k}); \\ t_{\text{г}}^{i,k+1} = (1 - a_2 \cdot \Delta z \cdot t_{\text{г}}^{i,k}) + a_2 \cdot \Delta z \cdot t_{\text{ж}}^{i,k}; \\ p_{\text{г}}^{i,k+1} = (1 - b_2 \cdot \Delta z \cdot p_{\text{г}}^{i,k}) + b_2 \cdot \Delta z \cdot p^*(t_{\text{ж}}^{i,k}). \end{cases} \quad (2)$$

Процессы испарительного охлаждения в НИО описываются системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dt_{\text{ж}}}{dx} = a_1 \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{л}}) + b_1 \cdot (p - p^*) + c_1 \cdot (t_{\text{о}} - t_{\text{ж}}); \\ \frac{dt_{\text{в}}}{dz} = a_2 \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{в}}); \quad \frac{dp_{\text{в}}}{dz} = b_2 \cdot (p^* - p_{\text{в}}); \\ \frac{dt_{\text{о}}}{dz} = c_2 \cdot (t_{\text{ж}} - t_{\text{о}}) \end{cases} \quad (3)$$

и граничных условий: при $x = 0, t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}}^0$ при $z = 0, t_{\text{в}} = t_{\text{в}}^0, p = p^0, t_{\text{о}} = t_{\text{о}}^0$. Решение этих уравнений, полученное методом конечных разностей, имеет вид

$$\begin{cases} t_{\text{ж}}^{i+1,k} = [1 - (a_1 + c_1) \cdot \Delta x] \cdot t_{\text{ж}}^{i,r} + \\ + (a_1 \cdot t_{\text{в}}^{i,k} - b_1 \cdot p^{i,k} + b_1 \cdot p^{i,k*} + c_1 \cdot t_{\text{о}}^{i,k}) \cdot \Delta x, \\ t_{\text{в}}^{i,k+1} = (1 - a_2 \cdot \Delta z) \cdot t_{\text{в}}^{i,k} + a_2 \cdot t_{\text{ж}}^{i,k} \cdot \Delta z, \\ p_{\text{в}}^{i,k+1} = c_2 \cdot (1 - b_2 \cdot \Delta z) \cdot p_{\text{в}}^{i,k} + b_2 \cdot p^{i,k*} \cdot \Delta z, \\ t_{\text{о}}^{i,k+1} = (1 - c_2 \cdot \Delta z) \cdot t_{\text{о}}^{i,k} + c_2 \cdot t_{\text{ж}}^{i,k} \cdot \Delta z, \end{cases} \quad (4)$$

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 для многоступенчатых схем. Система уравнений (1, 2, 3, 6) 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.

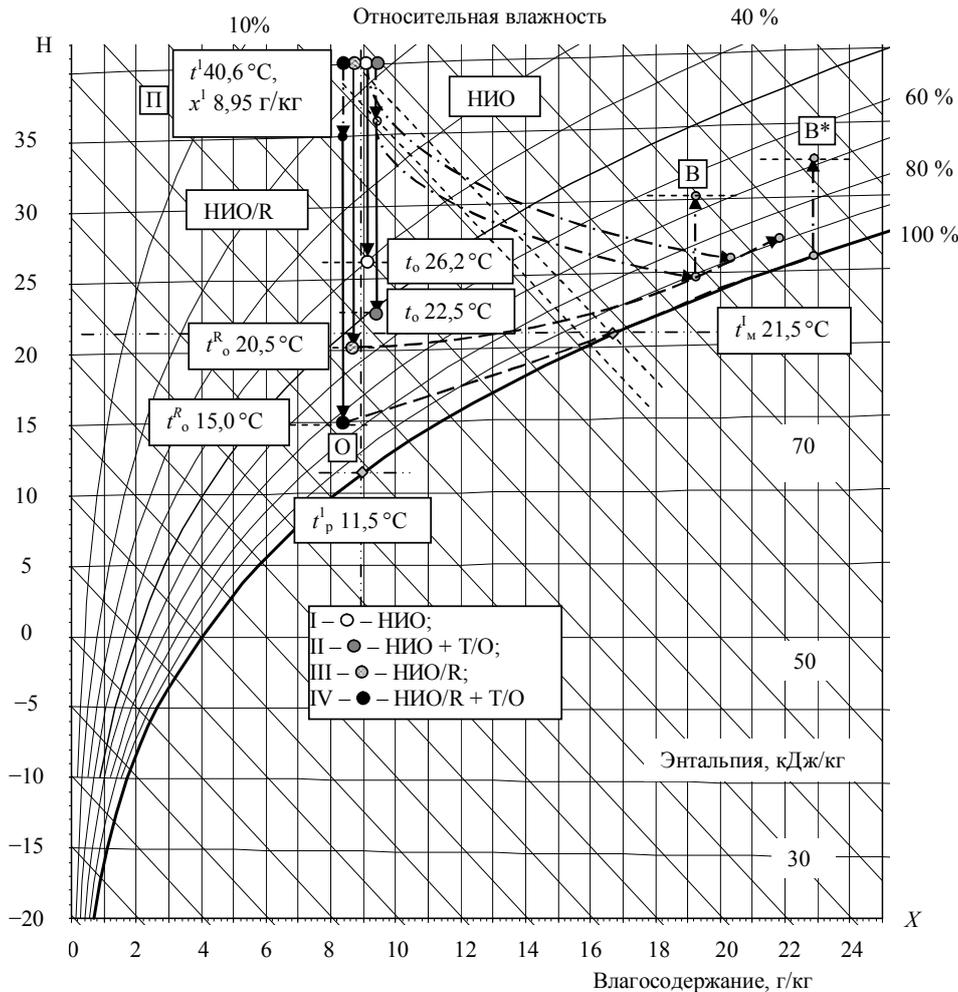


Рис. 5. Характер протекания процессов на H-X диаграмме влажного воздуха и принципиальные возможности испарительных охладителей непрямого типа НИО, НИО/R (ИЕС, ИЕС/R) в автономном варианте и с теплообменником на вспомогательном воздушном потоке, покидающем испарительный охладитель НИО (ИЕС)

Анализ возможностей испарительных охладителей (рис. 5) выполнен на основе ранее полученных в ОГАХ экспериментальных данных [1, 2]. При этом эффективность НИО по основному и вспомогательному потокам была принята равной $E_o = E_b = (t^1 - t^2)/(t^1 - t_m) = 0,65...0,75$, при эффективности теплообменников $E_{т/о} = 0,8$. Температура воды, рециркулирующей через «мокрую» часть НИО, принята $t_{ж}^* = t_m^1 + 1,5...2,5$ °С. На самом деле величина E_b несколько выше, чем E_o , а реальное значение величины $t_{ж}^*$ зависит от соотношения расхода воздушных потоков в «сухой» и «мокрой» частях НИО: $l = G_o/G_b$. Все теплообменные аппараты НИО, входящие в состав рассматриваемых охладителей, – пленочного типа с насадкой регулярной структуры, образованной многослойными многоканальными структурами из полимерных или керамических материалов пористой структуры [1, 2].

Поскольку возможности испарительных охладителей рассматривались применительно к задачам систем кондиционирования воздуха, начальное влагосодержание воздуха выбрано в диапазоне $x_1 < 12,5$ г/кг и на диаграмме Н-Х показана область комфортных параметров воздуха, обусловленная сочетанием температуры и относительной влажности воздуха в кондиционируемом помещении (КЗ) [2].

На рис. 5 на Н-Х диаграмме влажного воздуха показаны возможности испарительных охладителей для двух вариантов схемной компоновки: НИО и НИО/Р. Здесь показаны процессы охлаждения основного воздушного потока (при неизменном влагосодержании) и изменения состояния вспомогательного воздушного потока в каждой из трех ступеней охлаждения НИО соответственно. Были рассмотрены следующие варианты охладителей: I – НИО; II – НИО + Т/О; III – НИО/Р; IV – НИО/Р + Т/О.

Соответственно, для параметров наружного воздуха $t^1 = 40,6$ °С, $x^1 = 8,95$ г/кг были получены следующие температуры охлаждения продуктового воздушного потока: НИО – 26,2 °С; НИО + Т/О – 22,5 °С; НИО/Р – 20,5 °С; НИО/Р + Т/О – 15,0 °С.

Если учесть, что температура мокрого термометра наружного воздуха составляла $t_m^1 21,5$ °С, а температура точки росы $t_p^1 11,5$ °С, охладитель НИО/Р обеспечивает снижение предела охлаждения ниже традиционного предела, а использование теплообменника на вспомогательном воздушном потоке обеспечивает уровень охлаждения, близкий к точке росы наружного воздуха. Это открывает принципно

ально новые возможности использования испарительных охладителей газов и жидкостей в энергетических системах.

На рис. 6 дополнительно, для сравнения и выяснения реальных возможностей нового принципа охлаждения, проанализированы процессы в многоступенчатых испарительных охладителях, оформленных по формулам «НИО/НИО/НИО», в двух основных вариантах. Для тех же параметров наружного воздуха $t^1 = 40,6$ °С, $x^1 = 8,95$ г/кг, двухступенчатый охладитель обеспечивает температуру охлажденного воздуха 23 °С, то есть достижение параметров комфортности. Трехступенчатый охладитель обеспечивает снижение температуры продуктового воздушного потока ниже значения $t_m^1 = 21,5$ °С, то есть для него пределом охлаждения является точка росы наружного воздуха ($t_p = 11,5$ °С), 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 видно из построений на рис. 6, для варианта многоступенчатого охладителя по схеме Б в большей степени выражена и опасность конденсации (см. ход процессов во вспомогательном воздушном потоке на рис. 7), что требует выработки рекомендаций к распределению расходов контактирующих воздушных потоков по ступеням охладителя. Это важная часть выполняемого нами исследования ИО. Основным выводом здесь, в отличие от рекомендаций работ [6, 9], является необходимость варьирования соотношения основного и вспомогательного потоков по ступеням охлаждения, или, применительно к одноступенчатому варианту охладителя, по его длине. Без этого условия реальная эффективность охлаждения резко снизится.

Использование испарительных охладителей нового типа в целях охлаждения сред и термовлажностной обработки воздуха позволяет снизить энергозатраты, в сравнении с традиционной пароконпрессионной техникой охлаждения, в среднем на 25...35 % и существенно повысить экологическую чистоту новых решений [1, 2, 4].

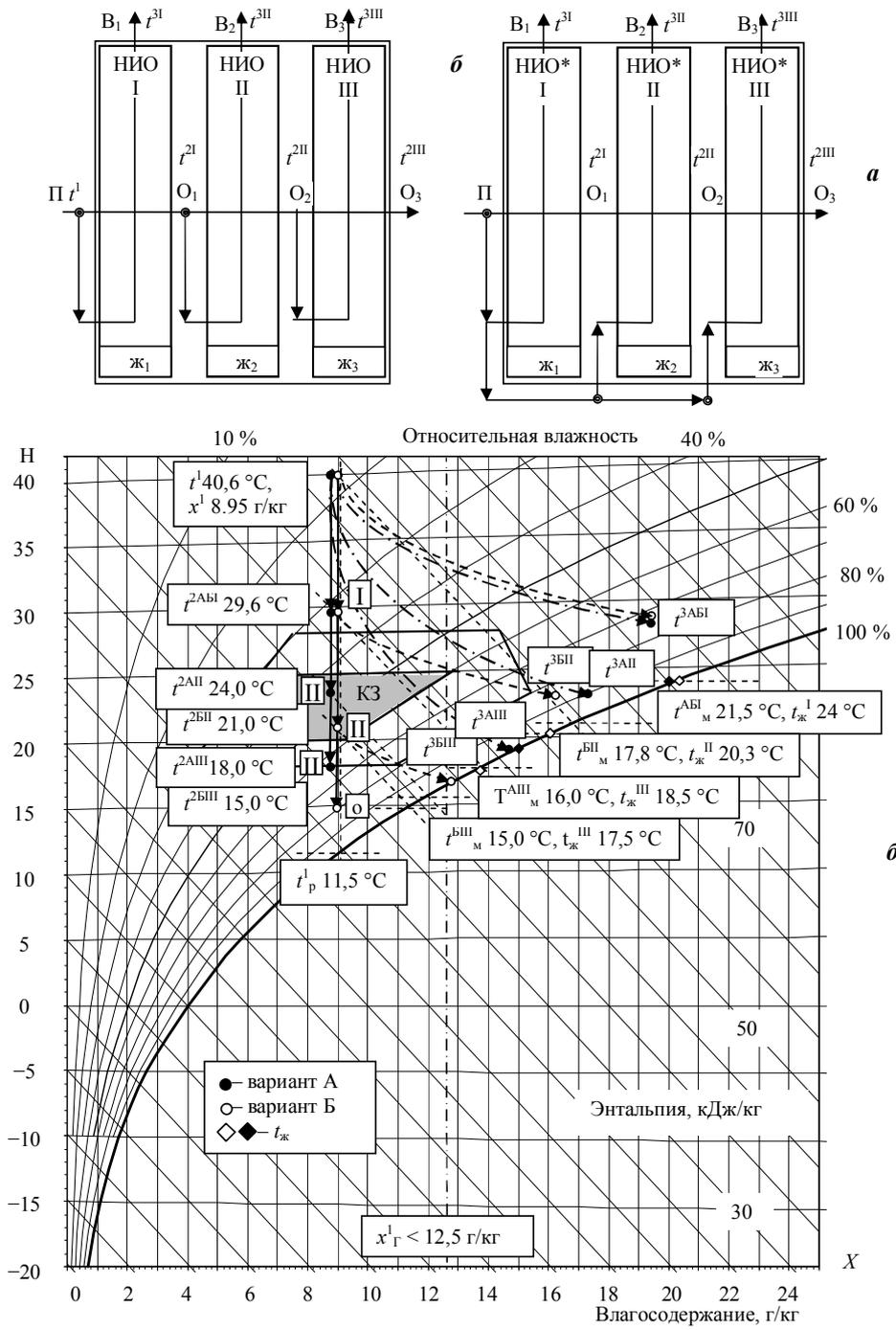


Рис. 6. Принципиальные компоновки моноблочного многоступенчатого испарительного охладителя непрямого типа НИО/НИО/НИО (а и б) и характер протекания процессов на Н-Х диаграмме влажного воздуха: П, О, В – полный, основной и вспомогательный воздушные потоки; I, II, III – ступени охладителей НИО

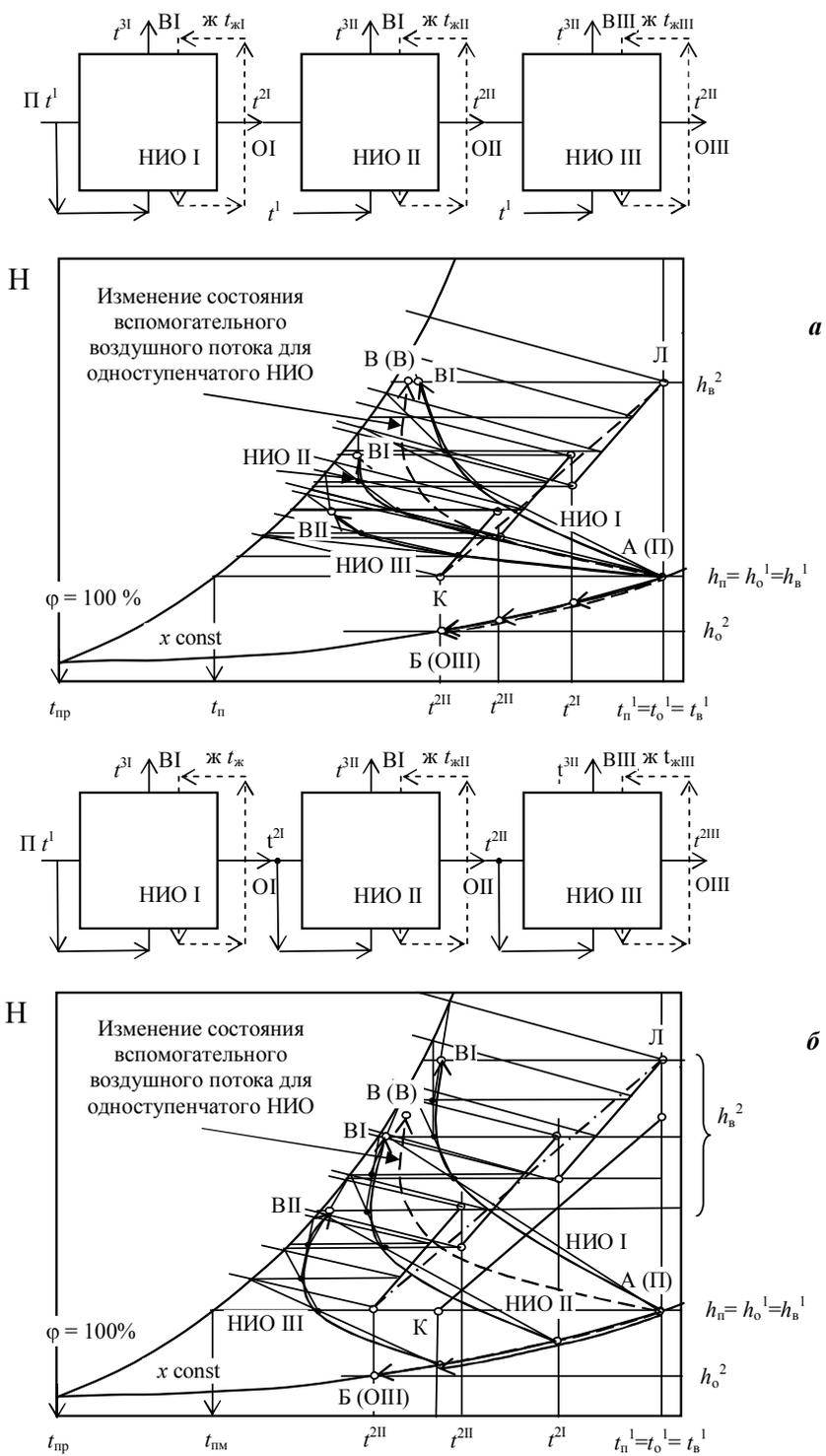


Рис. 7. Возможности многоступенчатых испарительных воздухоохладителей НИО и ход процессов во вспомогательных воздушных потоках

ВЫВОДЫ

1. 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.

2. Для многоступенчатого охладителя на основе моноблока НИО пределом охлаждения также 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.

3. Использование нового принципа испарительного охлаждения сред по схеме НИО/R, как в одно-, так и во многоступенчатых вариантах, позволяет су-

щественно расширить возможности самих методов испарительного охлаждения, понизить глубину охлаждения и, применительно к традиционным методам охлаждения, основанным на парокомпрессионной технике, снизить энергозатраты.

4. Основным требованием к реализации процесса ИО сред в охладителях нового типа является необходимость варьирования соотношения основного и вспомогательного потоков по ступеням охлаждения, или, применительно к одноступенчатому варианту охладителя НИО/R, по его длине, без чего реальная эффективность охлаждения резко снизится и требуемый эффект охлаждения достигнут не будет.

5. Дополнительное использование предварительного осушения наружного воздуха на основе теплоиспользующего абсорбционного цикла позволит в значительной мере понизить достигаемый уровень охлаждения сред.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Горин, А. Н.** Солнечная энергетика : теория, разработка, практика [Текст] / А. Н. Горин, А. В. Дорошенко. – Донецк : Норд-Пресс, 2008.
- [2] **Дорошенко, А.** Компактная тепломассообменная аппаратура для холодильной техники : теория, расчет, инженерная практика [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук / Одесский институт низкотемпературной техники и энергетики. – О., 1992.
- [3] **Дорошенко, А. В.** Перспективы использования испарительного охлаждения в холодильной технике [Текст] / А. В. Дорошенко, О. А. Лисогурская, М. В. Розум // Проблемы региональной энергетики : науч. журнал. – Кишинев (Молдова) : Институт энергетики Академии наук Молдовы. – 2013. – № 2 (22).
- [4] **Foster, R. E.** Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide [Text] / R. E. Foster, E. Dijkstra // International Conference of Applications for Natural Refrigerants' 96. – Aarhus, 1996. – P. 101–109.
- [5] **McNab, L. John.** Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger [Text] / L. John McNab, P. McGregor // 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF. – Washington, 2003.
- [6] **Maisotsenko, V.** The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling // 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF [Text] / V. Maisotsenko, Gillan Lelland. – Washington, 2003.
- [7] **Steimle, F.** Development in Air-Conditioning. International Conference of Research, Design and Conditioning Equipment in Eastern European Countries [Text]. – Bucharest. – P. 13–29.
- [8] **Stoitchkov, N. J.** Effectiveness of Crossflow Plate Heat Exchanger for Indirect Evaporative Cooling [Text] / N. J. Stoitchkov, G. J. Dimirov // Int. J. Refrig. – 1998. – Vol. 21, no. 6. – P. 463–471.
- [9] Thermodynamic performance assessment of a novel air cooling cycle: [Text] / Hakan Caliskan, Arif Hepbasli, Ibrahim Dincer, Valeriy Maisotsenko Maisotsenko cycle // International Journal of Refrigeration. – 2011. – № 34. – P. 980–990.

© О. В. Дорошенко, К. Б. Жук, М. В. Розум
Надійшла до редколегії 09.09.13
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. М. І. Радченко