

РАЗДЕЛ 1**ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

УДК 536.248.2:532.529.5

*А.В. Дорошенко*¹, *К.А. Ржесик*², *М.В. Гордиенко*²¹ Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082² Донецкий национальный университет экономики и торговли им. Михаила Туган-Барановского, ул. Щорса, 31, Донецк, 83050**НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ХОЛОДИЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Разработана концепция создания испарительных охладителей газов и жидкостей нового поколения на основе моноблочных многоканальных полимерных структур. 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 энергетических затрат на реализацию процессов. Особое внимание уделено вопросу реконденсации водяного пара при переходе на глубокое испарительное охлаждение сред. Выполнен, на основе теоретических и экспериментальных данных авторов, предварительный анализ возможностей таких охладителей применительно к решению задач испарительного охлаждения воды.

Ключевые слова: Испарительный охладитель – Многоканальная насадка – Полимерные материалы – Совместный тепломасообмен – Реконденсация.

*А.В. Дорошенко*¹, *К.А. Ржесік*², *М.В. Гордієнко*²¹ Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082² Донецький національний університет економіки та торгівлі ім. М. Туган-Барановського, вул. Щорса, 31, Донецьк, 83050**НОВІ МОЖЛИВОСТІ ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖУВАЧА ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ**

Розроблено концепцію створення випарних охолоджувачів газів і рідин нового покоління на основі моноблочних багатоканальних полімерних структур. Природною межею охолодження в таких системах є точка роси зовнішнього повітря, що істотно розширює можливості техніки випарного охолодження в цілому і дозволяє вирішувати ряд завдань холодильної техніки та техніки кондиювання повітря з істотним зниженням енергетичних витрат на реалізацію процесів. Особливу увагу надано питанню реконденсації водяної пари при переході на глибоке випарне охолодження середовищ. Виконано, на основі теоретичних і експериментальних даних авторів, попередній аналіз можливостей таких охолоджувачів стосовно до вирішення завдань випарного охолодження води.

Ключові слова: Випарний охолоджувач – Багатоканальна насадка – Полімерні матеріали – Спільний тепломасообмін – Реконденсація.

*A.V. Doroshenko*¹, *K.A. Rzhesik*², *M.V. Gordienko*²¹ Odessa national academy of food technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082² Donetsk University of Economics and Trade named M. Tugan-Baranovsky, 31 Shchorska St., Donetsk, 83050**NEW FEATURES OF EVAPORATIVE COOLERS FOR POWER AND REFRIGERATION SYSTEMS**

The concept of an evaporating cooling gases and fluids on the basis of the new generation multichannel polymeric structures. Natural cooling limit in such systems is the dew point of the ambient air, which significantly extends the capabilities of evaporative cooling technology in general and allows you to solve a number of problems of refrigeration and air-conditioning with a significant reduction in energy costs for implementing the processes. Special attention is paid to the condensation of water vapor when deep evaporative cooling media. Is made on the basis of theoretical and experimental data, the authors, preliminary analysis of the possibilities of such refrigerants with respect to evaporative cooling water in cooling towers and chillers.

Key words: Evaporative cooler – Polymeric materials – Combined heat and mass transfer – Condensation of water vapor.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сопряженные проблемы энергетики и экологии интенсифицируют поиск альтернативных решений в области холодильных и кондиционирующих систем. Эффективность испарительного охлаждения сред ограничена климатическими условиями, тем не менее, интерес к их возможностям в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой [1-9]. Испарительные охладители могут использоваться как в автономном варианте, так и в комбинированных системах, например в составе осушительно-испарительных охладителей, основанных на теплоиспользующем абсорбционном цикле, где предварительное осушение воздуха обеспечивает высокую эффективность последующего испарительного охлаждения сред в холодильных системах и термовлажностную обработку воздуха в системах кондиционирования [2, 3].

II. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

Методы испарительного охлаждения сред (ИО), основанные на естественной неравновесности окружающей среды в виде психрометрической разности температур широко применяются в традиционной энергетике, холодильной и криогенной технике и технике кондиционирования воздуха. Сравнительно с пароконденсационной холодильной техникой они обеспечивают существенную экономию энергозатрат и характеризуются высокой экологической чистотой. Это испарительные охладители прямого типа, воздуха (ПИО, direct evaporative cooling, DEC) и воды (градирни ГРД, cooling tower, CTW), испарительные конденсаторы и др. Возможности таких охладителей по достигаемому температурному уровню охлаждения ограничены температурой наружного воздуха по мокрому термометру t_m , являющейся естественным пределом охлаждения, и они существенно зависят от местных климатических условий. Как показано в работах [1-3], предел охлаждения определяется, помимо величины t_m , соотношением потоков газа и жидкости в аппарате $I = G_r/G_{ж}$, при этом реальное значение предела охлаждения t^* будет выше значения t_m . В равной мере это касается и степени использования воздушного потока в аппарате ИО, которая для градирни определится как предельная величина энтальпии воздуха, покидающего аппарат h^* , которая также зависит от величины соотношения контактирующих потоков и в общем случае окажется ниже чем h^0 (энтальпия воздушного потока покидающего ИО в состоянии полного насыщения при температуре поступающей на охлаждение воды, противоточная схема). Областью практического применения методов ИО являются энергетические системы, где широко используются градирни и воздухоохладители; холодильные системы, где ИО используются для

охлаждения конденсаторов ХМ; в системах кондиционирования воздуха для его термовлажностной обработки. Снижение температурного уровня охлаждения обеспечивает и общее уменьшение количества воды, используемой в градирнях, что для современных энергетических систем означает реальное уменьшение количества воды, требуемое для компенсации потерь на испарение (до 20-25%) [1-3], что чрезвычайно важно, поскольку вода, потребляемая в громадных объемах на цели охлаждения в энергетике, является стратегическим ресурсом страны.

III. НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ ГАЗОВ И ЖИДКОСТЕЙ

В работах [2, 3, 8, 9] рассмотрены ИО непрямого типа, обеспечивающие бесконтактное охлаждение продуктового потока газа или жидкости (воды или воздуха), и использующие вспомогательный воздушный поток, вступающий в непосредственный контакт с рециркулирующей через «мокрую» часть аппарата водой в виде стекающей по поверхностям канала жидкостной пленки. Это ИО воздуха непрямого типа (НИО, indirect evaporative cooling, ИЕС) и жидкости. Пределом охлаждения здесь также является t_m . Продуктовый (основной) воздушный поток, охлажденный в НИО при неизменном влагосодержании, имеет сниженную температуру мокрого термометра и может использоваться в многоступенчатом охладителе (по формуле «НИО-НИО-НИО»), либо в комбинированном охладителе (по формулам «НИО-ПИО» или «НИО-ГРД») для более глубокого охлаждения сред, и, в этом случае пределом охлаждения является точка росы наружного воздуха t_p , что самым существенным образом расширяет диапазон практического использования ИО. И здесь предел охлаждения зависит от соотношения контактирующих потоков (применительно к НИО это соотношение основного и вспомогательного воздушных потоков, $I = G_o/G_B$). Особенно перспективным является использование так называемой регенеративной схемы НИО/Р (ИЕС/Р), которая, по сути, является одноступенчатой реализацией многоступенчатой схемы ИО. В работе [4] и на рисунке 1 представлен вариант этого решения для водоохладителя (чиллера, Ch-Rw). На Н-Т диаграмме влажного воздуха видно, что предварительное охлаждение наружного воздуха в теплообменнике 2 обеспечивает ИО воды в чиллере с пределом t_p . Следует обратить внимание на характер изменения состояния воздушного потока в насадке градирни (А-С), протекающий практически вдоль линии $\phi \sim 100\%$. Нами предложен ряд решений для одно- (рисунок 2) и многоступенчатых ИО (рисунок 3Б) и выполнен, на основе собственных экспериментальных данных (ИО с насадкой из моноблоковых многоканальных полимерных структур) [1-3] анализ их принципиальных возможностей

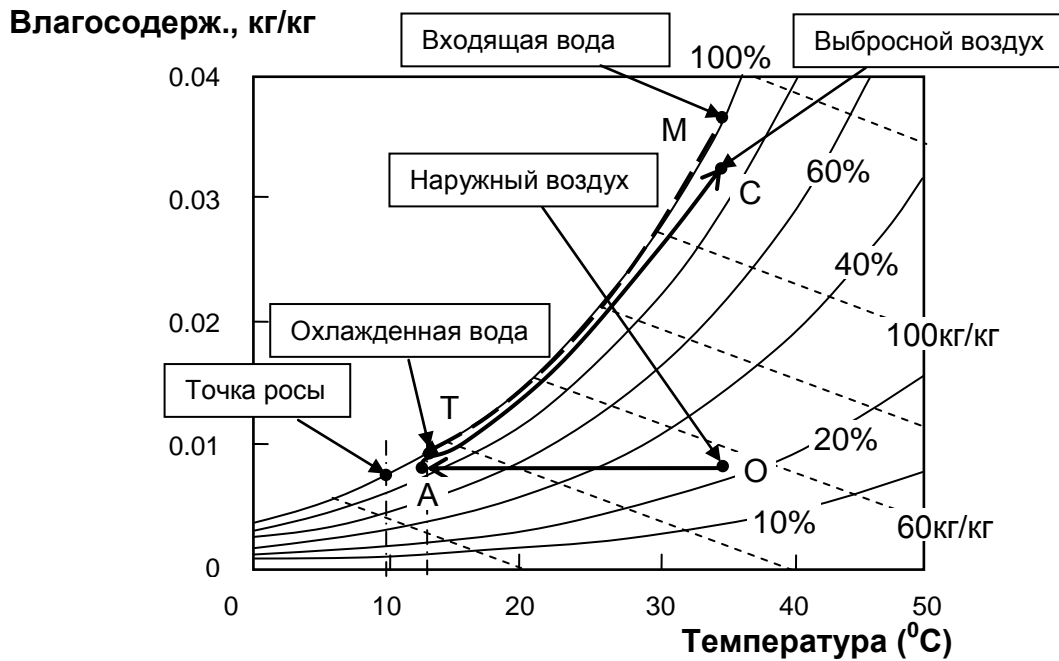
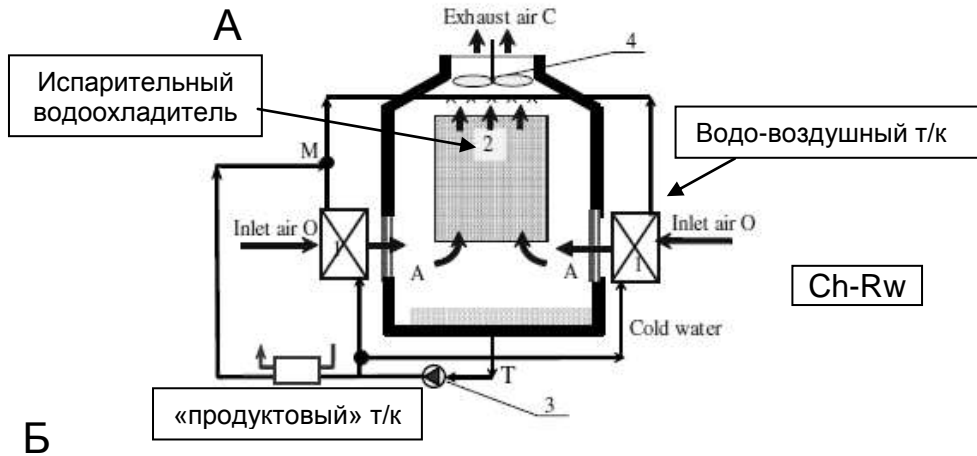
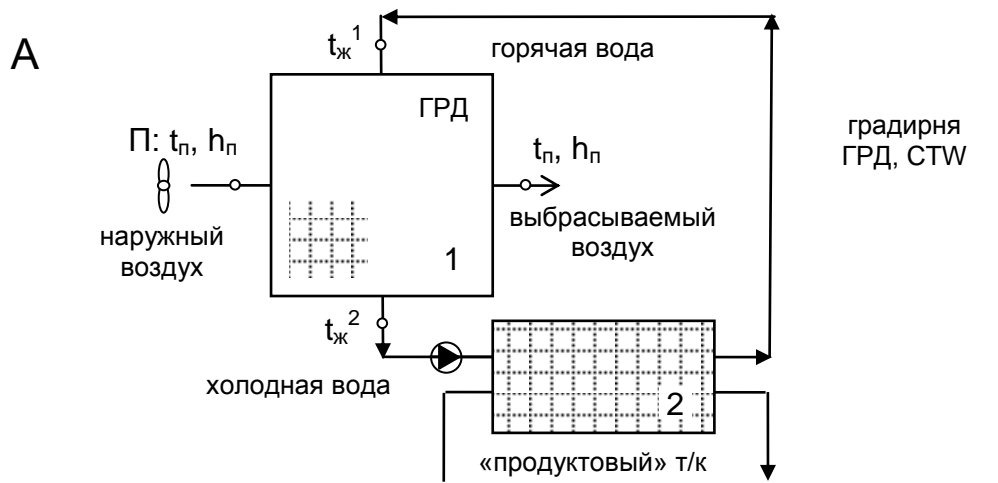


Рисунок 1 – Принципиальная схема испарительного охладителя воды (градирни) непрямого типа, чиллера (Chiller, Ch-Rw по работе *Y. Jiang, X. Xie. Solar Energy 84 (2010) 2041-2055* [4]).

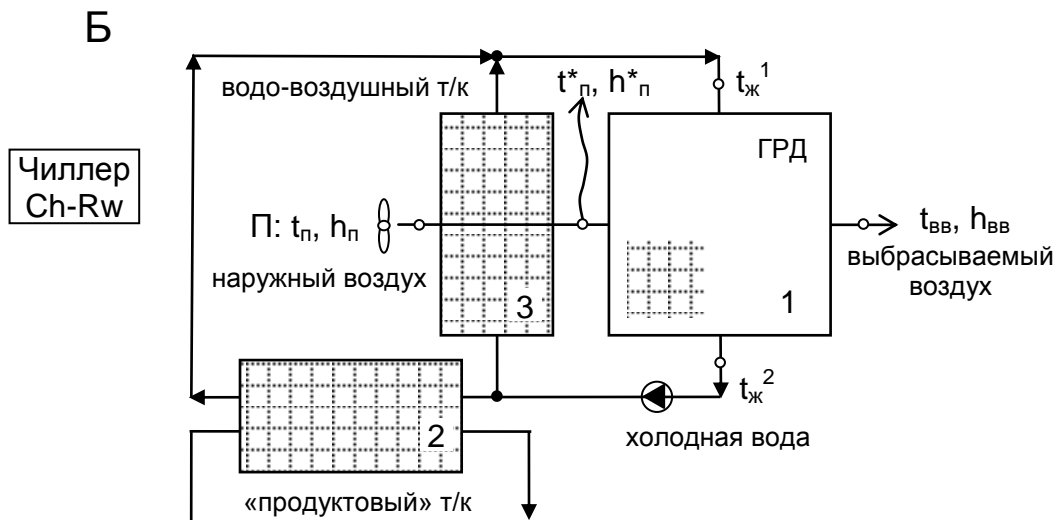
Обозначения:

А – Чиллер (Ch-Rw) на основе водо-воздушного теплообменника 1 и испарительного водоохладителя насадочного типа 2; 3 – водяной насос; 4 – вентилятор.

Б – процессы охлаждения на H-T диаграмме влажного воздуха: O-A – охлаждение наружного воздуха в т-ке 1; A-C – изменение состояния воздушного потока в насадке градирни; M-T – процесс охлаждения воды в насадке испарительного охладителя 2 (процесс показан на диаграмме условно)



Водоохладитель прямого типа ГРД , Cooling Tower CTW



Испарительный водоохладитель - чиллер на основе градирни ГРД (Chiller, Ch-Rw); предел охлаждения – температура точки росы наружного воздуха

Рисунок 2 – Принципиальные схемные решения испарительных водоохладителей прямого (А, градирня) и непрямого (Б) типов (водоохладитель, чиллер Ch-Rw), построенные по раздельной схеме. Обозначения: 1 – градирня ГРД; 2, 3 – теплообменники (водо- и воздухоохладитель)

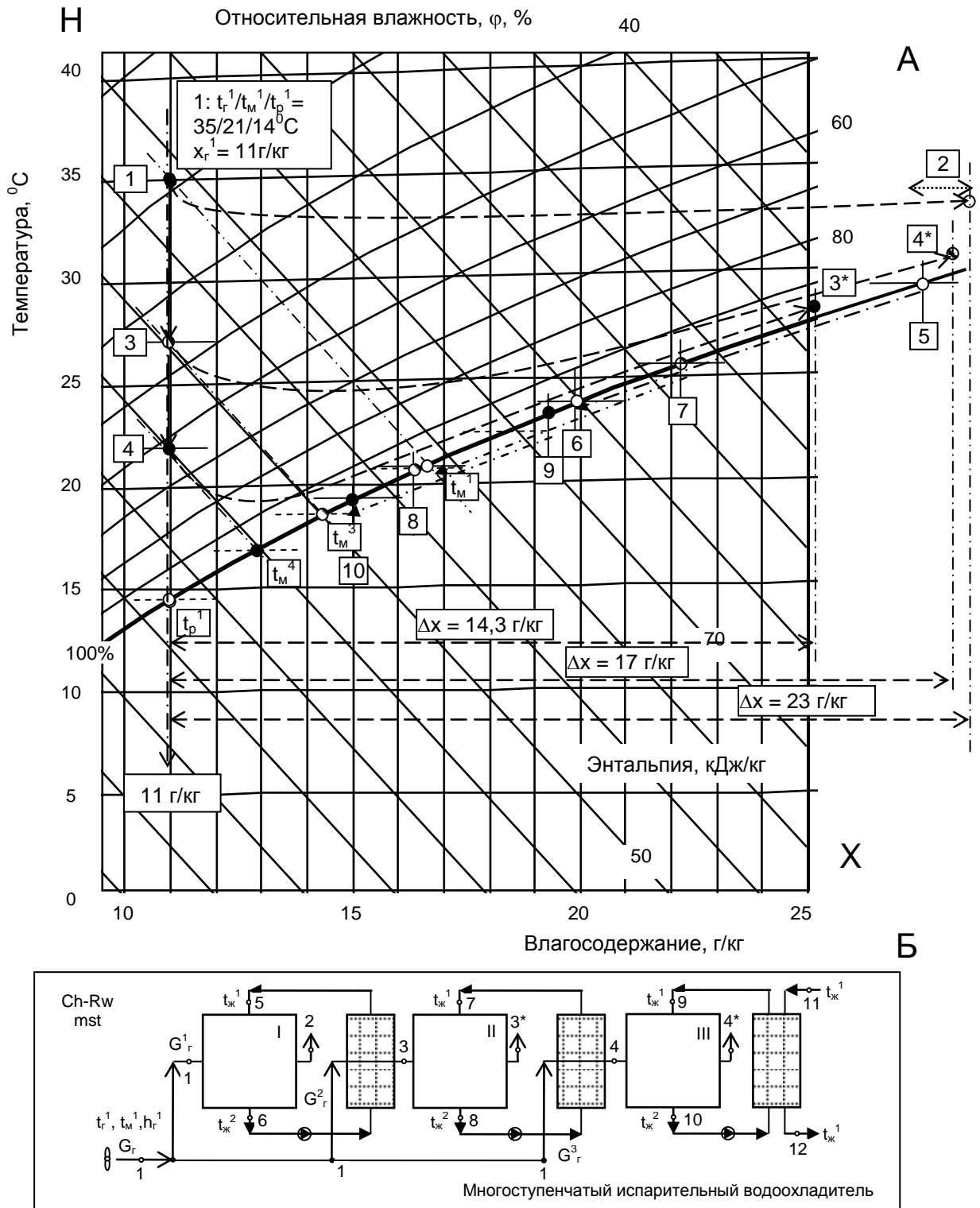


Рисунок 3 – Протекание процессов в многоступенчатом испарительном водоохладителе на H-X диаграмме влажного воздуха (А).

Обозначения: I-III – последовательные ступени охлаждения (гадирни); 1-12 – номера расчетных точек (термо-влажностные параметры потоков газа и жидкости по схеме (Б))

IV. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ВОДООХЛАДИТЕЛЕЙ

На Н-Х диаграмме влажного воздуха показано протекание процессов в одно- (рисунок 3) и многоступенчатых ИО (рисунок 4). При этом эффективность градирни ГРД была принята равной $E_{Ж} = (t_{ж}^1 - t_{ж}^2)/(t_{ж}^1 - t_{М}^1) = 0.65-0.75$, при эффективности теплообменников $E_{Т/О} = 0.8$. Рисунок 3 наглядно иллюстрирует новые возможности ИО воды (многоступенчатого чиллера Ch-Rw), когда для условий наружного воздуха $t_{Г}^1/t_{М}^1/t_{Р}^1 = 35/21/14^{\circ}\text{C}$, $x_{Г}^1 = 11$ г/кг, достигается температура охлажденной воды $t_{ж}^2 = 19^{\circ}\text{C}$, т.е. ниже $t_{М}^1$.

В работе [1], на основе «метода энтальпийного потенциала», был развит метод анализа состояния воздушного потока в ИО, позволяющий оценить падение эффективности процесса ИО при возникновении туманообразования в верхней зоне аппарата (процесс реконденсации). Это показывает, что достичь реально $t_{Р}^1$ не удастся именно по причине возрастающей степени приближения воздушного потока к кривой насыщения со снижением температурного уровня охлаждения (последовательно в каждой ступени). При неизменном соотношении расходов контактирующих потоков газа и жидкости $l = G_{Г}/G_{Ж}$ в каждой ступени происходит неблагоприятное смещение рабочей линии процесса с соответствующим падением эффективности. Одним из решений этой проблемы может быть регулирование величины $l = G_{Г}/G_{Ж}$ по ступеням охлаждения. На рисунке 4 показано сравнение возможностей обычной градирни (ГРД) и одноступенчатого испарительного водоохладителя, чиллера (Ch-Rw), реально обеспечивающего глубокое охлаждение воды, ниже $t_{М}^1$.

ВЫВОДЫ

1. Переход от схемы традиционной ГРД к ИО с предварительным охлаждением наружного воздуха позволяет снизить температуру охлаждения; здесь пределом охлаждения является температура точки росы наружного воздуха, что существенно расширяет возможности практического использования ИО сред.

2. Для многоступенчатого ИО пределом охлаждения также является точка росы наружного воздуха; использование в составе охладителя теплообменника на холодном воздушном потоке, покидающем «нижние» ступени (II и III) дополнительно и существенно улучшит его характеристики.

3. Основным требованием к реализации процесса ИО в охладителях нового типа является необходимость варьирования соотношения контактирующих потоков газа и жидкости по ступеням охлаждения, без чего реальная эффективность охлаждения резко снизится и требуемый эффект охлаждения достигнут не будет.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дорошенко А.** Компактная теплообменная 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. **Дорошенко А.В., Васютинский С.Ю., Филлин С.О., Богуслав Закшевский.** Evaporative Coolers in Alternative Energetics / Испарительные охладители в альтернативной энергетике, Западно-поморский технологический университет, Щецин, Польша, 2012, 439 с.
3. **Дорошенко А.В., Глауберман М.А.** Альтернативная энергетика, Солнечные системы теплохладоснабжения, Одесса, ОНУ им. Мечникова, 2012, 447стр.
4. **Y. Jiang, X. Xie.** Theoretical and performance of an innovative indirect evaporative chiller. Solar Energy 84 (2010) – P. 2041-2055
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **Maisotsenko V., Lelland Gillan, M.** 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
9. **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) – P. 980-990.

REFERENCES

1. **Doroshenko A.** Kompaktnaya teplomassobmennaya apparatura dlya kholodilnoi tekhniki (teoriya, raschet, inzhenernaya praktika). Doktorskaya dissertatsiya, OINTE. Odessa. - 1992. - t. 1. - 350 s., t. 2. - 260 s.
2. **Doroshenko A.V., Vasyutinsky S.Yu., Filin S.O., Boguslav Zakshevsky.** Evaporative Coolers in Alternative Energetics / Isparitelnie okhladiteli v alternativnoi energetike. Zapadno-pomorsky tekhnologicheskyy universitet, schetsin, Polsha, 2012, 439 s.
3. **Doroshenko A.V., Glauberman M.A.** Alternativnaya energetika, Solnechnie sistemi teplokhladadosnabzheniya, Odessa, ONU im. Mechnikova, 2012, 447 s.

4. **Y. Jiang, X. Xie.** Theoretical and performance of an innovative indirect evaporative chiller. *Solar Energy* 84 (2010) – P. 2041-2055
5. **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.
6. **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.
7. **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.
8. **Maisotsenko V., Lelland Gillan, M.** 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling. 21^h International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
9. **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) – P. 980-990.

Получена в редакції 26.11.2013, прийнята к печати 03.12.2013