

РАЗДЕЛ 1**ХОЛОДИЛЬНАЯ ТЕХНИКА**

УДК 536.248.2:532.529.5

А.В. Дорошенко, Д.Н. Чебан*Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики им. В.С. Мартыновского Одесской национальной академии пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082.***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРИСТОЙ КЕРАМИКИ В ОБЛАСТИ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Создание комбинированных холодильных систем на основе интеграции (рационального сочетания) естественного испарительного охлаждения и искусственного (традиционного парокомпрессионного охладителя) позволяет снизить реальные энергозатраты и существенно улучшить характеристики охладителя за счет снижения температуры конденсации в холодильной машине (ХМ). Относительно испарительного охлаждения такое построение холодильных систем позволяет существенно уменьшить, либо свести к нулю необходимость подпитки свежей водой. В работе представлен анализ характеристик комбинированных систем на основе полученных авторами экспериментальных результатов и современных расчетных программ. В среднем новое поколение холодильных систем обеспечивает снижение энергозатрат на 14÷60% и существенное улучшение экологических показателей.

Ключевые слова: испарительное охлаждение – пористая керамика – комбинированная холодильная система.

The creation of combined refrigeration system based on integration (rational combination) of natural evaporative cooling and artificial (traditional compression cooling) can reduce the actual energy consumption and significantly improve the characteristics of cooler by reducing the temperature of condensation in the refrigeration machine (RM). Such combined refrigeration systems can significantly reduce or reduced to zero the need to feed with fresh water relatively of evaporative cooling. The analysis of the characteristics of the combined systems, based on the authors' experimental results and advanced calculation programs is presented in this paper. On the average, the new generation of refrigeration systems reduces energy consumption by 14 ÷ 60% and significantly improves environmental performance.

Keywords: evaporative cooling – porous ceramics – combined refrigeration system.

I. ВВЕДЕНИЕ

Усугубляющиеся проблемы энергетики и экологии выдвигают новые требования к аппаратуре холодильных систем и систем комфортного и технологического кондиционирования воздуха СКВ, в первую очередь, снижения энергозатрат и антропогенного воздействия на среду обитания. К наиболее перспективному и долгосрочному решению в этом направлении относится создание альтернативных систем на основе нетрадиционных источников энергии, в частности, испарительных методов охлаждения сред. 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 [1-2].

II. ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМНЫЕ РЕШЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ СХЕМ

Наиболее перспективно включение испарительных охладителей в состав комбинированных

испарительно-парокомпрессионных систем. Создание испарительно-парокомпрессионных систем на основе испарительного охладителя прямого (ПИО или ГРД) или непрямого (НИО) типа (первая ступень) и холодильная машина (ХМ) (вторая ступень), позволяет «включить» испарительный охладитель в холодильную систему на верхнем температурном уровне, где он достаточно эффективен, и использовать отбросной холодный и увлажненный вспомогательный воздушный поток для обдува конденсатора ХМ, а возврат конденсата из испарителя ХМ в контур испарительного охлаждения ПИО или НИО, может обеспечить полностью замкнутый цикл по потребляемой охладителем воде. На рис.1 приведены схемы комбинированных испарительно – парокомпрессионных систем охлаждения воздуха и воды различных конфигураций.

Система ПИО/ХМ (рисунок 1А). Охлаждение воздушного потока осуществляется последовательно в первой ступени охлаждения, роль которой исполняет ПИО и затем в испарителе холодильной машины. При этом часть охлажденного в ПИО потока обеспечивает процесс конденсации ХМ, который теперь реализуется не при температуре наружного воздуха, а при температуре наружного воздуха по мокрому термометру, что обеспечивает оптимальную работу ХМ. Для всех

рассмотренных комбинированных решений были выполнены расчеты на основе полученных экспериментальных результатов по испарительному охлаждению [1-2] и с использованием программы Coolpack. Расчеты были выполнены на хладагенте R134a, полученные результаты для комбинированных систем практически не зависят от типа хладагента.

Комбинированная система кондиционирования воздуха (СКВ) на основе ПИО-ХМ обеспечивает: снижение энергозатрат на привод парокompрессионной холодильной машины в среднем на 20% и на всю систему на 12%± 14%. Комбинированная СКВ оказывается полностью замкнутой по потребляемой воде при параметрах наружного воздуха $t_A=32^{\circ}\text{C}$ и $X_A>13\text{г/кг}$, поскольку затраты воды в ступени испарительного охлаждения могут

быть полностью компенсированы конденсатом из испарителя холодильной машины.

Комбинированная СКВ на основе НИО-ХМ представляет собой двухступенчатый охладитель, первой ступенью которого является «сухая» часть НИО, а второй - испаритель ХМ (рисунок 1Б) [1-5,11]. Поскольку в НИО всегда есть вспомогательный воздушный поток, выбрасываемый в среду при достаточно низкой температуре, но увлажненный, и по этой причине не могущий использоваться в СКВ, именно поэтому он используется для охлаждения конденсатора ХМ. Воздушный поток предварительно (на верхнем температурном уровне) охлаждается в НИО при неизменном влагосодержании и затем уже поступает в испаритель ХМ. Такая система обеспечивает: снижение энергозатрат на привод парокompрессионной холо-

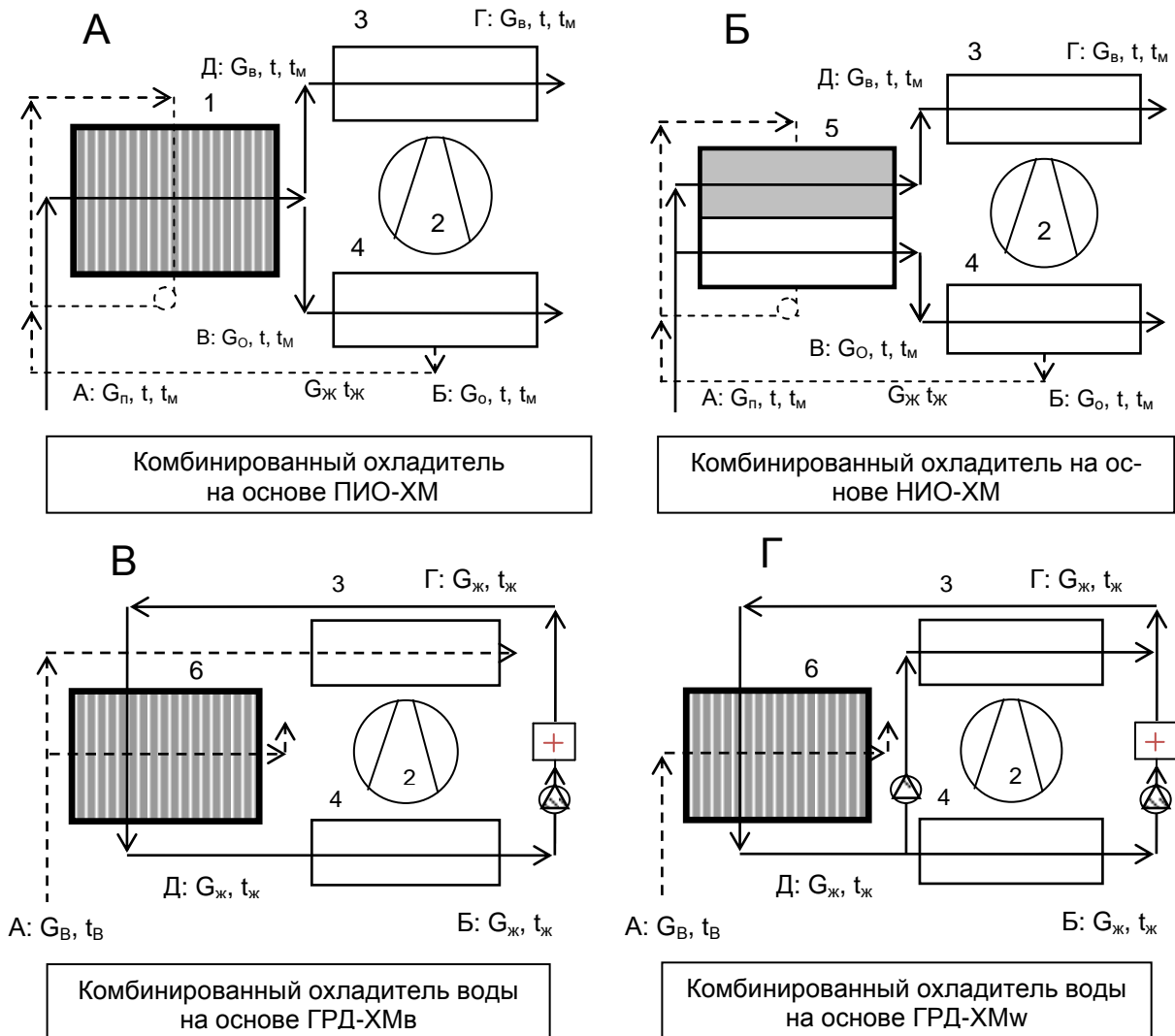


Рисунок 1 – Схемные решения комбинированных испарительно – парокompрессионных систем. А. Схема прямого испарительно – парокompрессионного охладителя воздуха ПИО-ХМ. Б. Схема непрямого испарительно – парокompрессионного охладителя воздуха НИО-ХМ. В. Схема испарительно – парокompрессионного охладителя воды с воздушным конденсатором ГРД-ХМв. Г. Схема испарительно – парокompрессионного охладителя воды с водяным конденсатором ГРД-ХМw. Обозначения: 1 – ПИО; 2 – ХМ; 3 – конденсатор; 4 – испаритель; 5 – НИО; 6 – градирня (ГРД); G_B – вспомогательный воздушный поток; G_O – основной воздушный поток

дильной машины в среднем на 50% и на всю систему на 40%÷45%. Комбинированная СКВ оказывается полностью замкнутой по потребляемой воде при параметрах наружного воздуха $t_A=32^\circ\text{C}$ и $X_A>12\text{г/кг}$, поскольку затраты воды в ступени испарительного охлаждения могут быть полностью компенсированы конденсатом из испарителя холодильной машины.

Комбинированная СКВ на основе ГРД-ХМв с воздушным конденсатором обеспечивает: снижение энергозатрат на привод парокompрессионной холодильной машины в среднем на 50%. Комбинированная СКВ на основе ГРД-ХМw с водяным конденсатором обеспечивает: снижение энергозатрат на привод парокompрессионной холодильной машины в среднем на 60%, что более эффективно, чем система ГРД-ХМв с воздушным конденсатором.

В ОГАХ был разработан и исследован модуль из многоканальной пористой керамики в автономном режиме ПИО и ГРД. Использование керамических материалов в конструкции ПИО и ГРД позволило увеличить эффективность процесса. Поскольку керамика пористая, за счет этого обеспечивается максимальная смачиваемость насадки (практически 100% смачиваемость) и устранение каплеуноса. Также это подтверждается и данными испанского исследования [5].

К несомненным достоинствам комбинированных испарительно-парокompрессионных охладителей относится снижение энергопотребления и рост экологической чистоты решений в целом.

III. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

Теплотехнический расчет комбинированных систем ПИО-ХМ, НИО-ХМ, ГРД-ХМ позволил графически наглядно показать их преимущества. На рисунке 2 показаны графики энергопотребления N и холодильного коэффициента COP для комбинированных систем в сравнении с автономной ХМ. При анализе использовались экспериментальные данные, полученные нами при исследовании характеристик испарительного охладителя ПИО, НИО и ГРД с насадкой из многоканальной пористой керамики. При использовании программы Coolpack возникает сложность, связанная с тем, что программа построена для автономной ХМ при одинаковых температурах потока, поступающих как в испаритель, так и в конденсатор, поскольку для НИО вспомогательный поток оказывается по температуре ниже основного (на $0,5\div1,5^\circ\text{C}$ в зависимости от реальных соотношений потоков). Мы принимали в расчетах температуры этих потоков неизменными, что в конечном итоге несколько искажает реальную картину процессов в комбинированной системе и приводит к определенным отклонениям полученных результатов. Это не нарушает общую качественную картину протекающих процессов.

При сопоставлении ХМ и ПИО-ХМ (рисунок 2), расчеты выполнены для одинаковых условий работы сравниваемых систем ($Q_0=17,9\div55,2\text{кВт}$). Комбинированная система позволяет снизить энергозатраты на 12÷14%; при этом температура конденсации снижается на $6\div8^\circ\text{C}$. Для НИО-ХМ ($Q_0=26,9\div57\text{кВт}$) снижение мощности составляет 40÷45%, а температура конденсации снижается на $7\div9^\circ\text{C}$. При этом следует отметить более благоприятную тенденцию возрастания мощности для НИО-ХМ, чем для ПИО-ХМ; особо отметим, что расчеты для НИО-ХМ были выполнены для соотношения потоков $L=G_B/G_0=1$, когда на самом деле принцип НИО позволяет варьировать это соотношение. Для ГРД-ХМв ($Q_0=2,9\div4,9\text{кВт}$) снижение мощности составляет 50%. Для ГРД-ХМw ($Q_0=2,9\div4,9\text{кВт}$) снижение мощности составляет 60%, и при этом появляется возможность разгрузить конденсатор ХМ, снизив температуру конденсации на $7\div8^\circ\text{C}$.

Особый интерес представляет использование прямого испарительного предохлаждения воздуха для понижения температуры конденсации в воздушных конденсаторах холодильных машин. Это важно для регионов земного шара с сухим и жарким климатом, где высокая температура наружного воздуха существенным образом сказывается на работе холодильного оборудования, приводя к росту температуры и давления конденсации хладагента, а сухой климат позволяет эффективным образом использовать прямое испарительное охлаждение воздушного потока в ПИО, поступающего в воздушный конденсатор, что значительно расширяет температурный диапазон безотказной работы оборудования в целом.

IV. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ СИСТЕМ

На основе методологии оценки «полного жизненного цикла, ПЖЦ» (“Life Cycle Assessment”, LCA) выполнен сравнительный анализ разработанных альтернативных систем. В отличие от традиционного технико-экономического анализа, в работе выполнена оценка экологических индикаторов. Методология LCA разработана в соответствии со стандартами ISO (14040, 14041, 14042 и 14043). Методику расчета экологических индикаторов применяют для сравнения альтернативных систем с целью минимизации влияния на окружающую среду, а также для выявления потенциальных возможностей снижения антропогенной нагрузки, при изучении различных вариантов решений. При анализе учитываются: расход энергии и выделения вредных веществ при производстве материалов для анализируемого объекта, потребление энергии и других расходных материалов (например, хладагента) при эксплуатации, а так же дополнительные затраты энергии при утилизации объекта и сопутствующие этому выбросы вредных веществ. Были выбраны такие обобщенные эколого-энергетические критерии:

влияние ПЖЦ сравниваемых систем на глобальное изменение климата (соответствует полной эмиссии парниковых газов); истощение природных ре-

сурсов при создании, эксплуатации и утилизации систем (соответствует полному потреблению органического топлива и минеральных ресурсов и

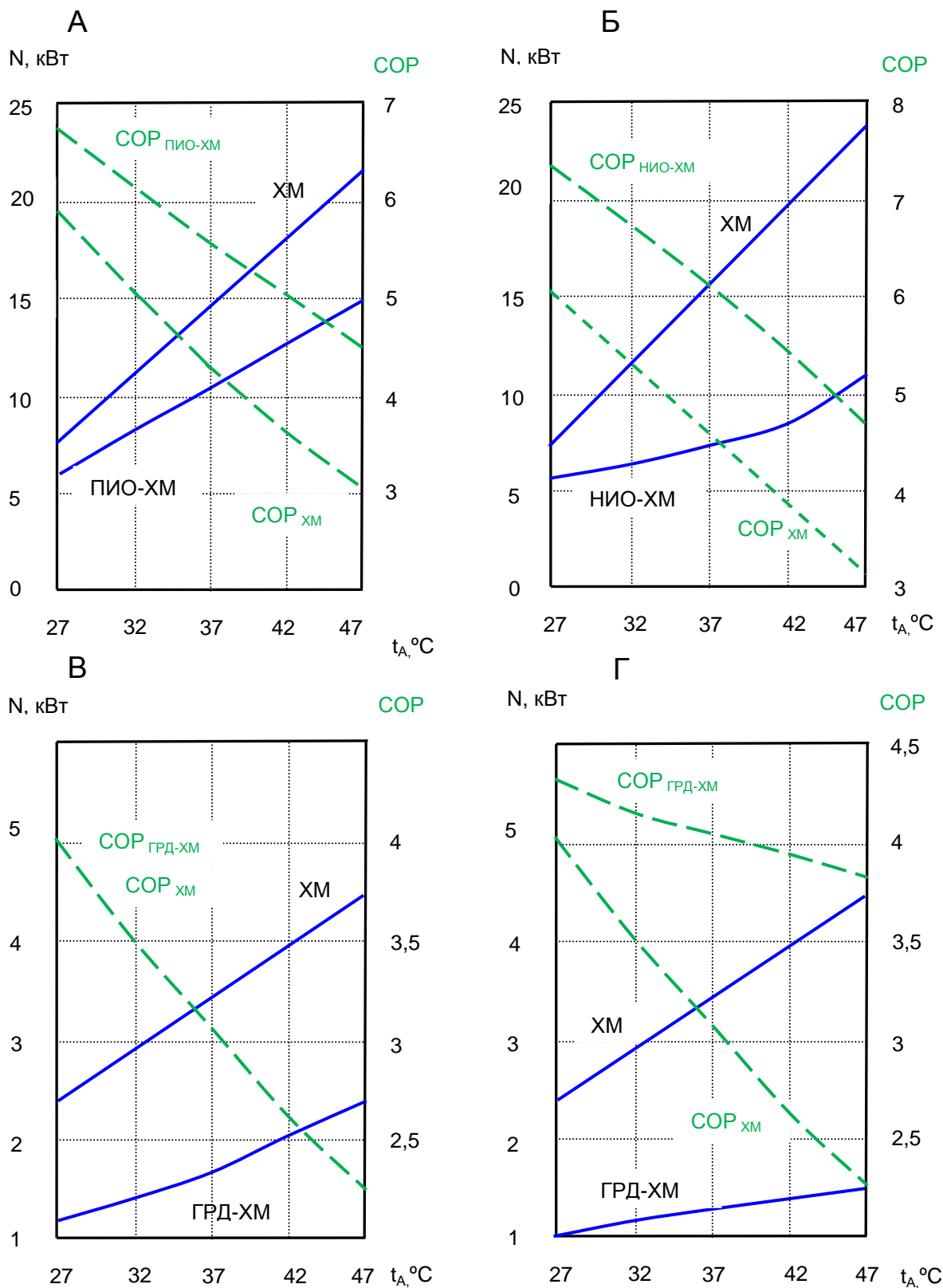


Рисунок 2А – График зависимости мощности компрессора N от изменения температуры t_A воздуха среды при неизменном влагосодержании $x_A=17\text{г/кг}$ (система ПИО-ХМ). Б. Тоже в системе НИО-ХМ. В. Тоже в системе ГРД-ХМ с воздушным конденсатором. Г. Тоже в системе ГРД-ХМ с водяным конденсатором.

за ПЖЦ); ущерб, наносимый окружающей среде, т.е. соответствующие данному ущербу экоиндикаторы (отдельно учитывается ущерб человеческому здоровью, экосистеме и истощение природных ресурсов). Расчет всех выбранных критериев основан на методологии *eco-indicator 99*.

Влияние на климат выражается в специальных единицах DALY (Disability adjusted life years), т.е. в этом индикаторе учитывается потеря трудоспособности, вызванная болезнями от каждого вида возможного вредного влияния. В соответствии с методикой оценки полного эквивалента глобального потепления, влияние на изменение климата принято выражать через кг CO₂. Учитывались все выбросы CO₂ при производстве энергии и материалов, а так же при эксплуатации оборудования и его утилизации. Кроме того, учитывались выбросы всех других парниковых газов на всех стадиях ПЖЦ. Вклад парниковых газов в изменение климата так же вычисляется в кг CO₂ (пересчитывается с помощью специальной величины GWP парникового газа, кг/кг CO₂). Отметим, что 1 кг CO₂ соответствует 2.1.10⁻⁷ DALY. Вклад в истощение ресурсов выражается в мДж (показывает дополнительные затраты энергии, необходимые в будущем для извлечения руды и топлива более низкого качества). Эта величина прямо пропорциональна количеству потребленных энергоресурсов на создание, эксплуатацию и утилизацию рассматриваемого объекта. Три категории ущерба – влияние на здоровье человека, – качество экосистемы, – истощение ресурсов, оценивались в эко-единицах. Шкала, в которой сравнивается относительное воздействие на окружающую среду, выбрана таким образом, чтобы 1 Pt (эко-единица) представляла одну тысячную часть ежегодной нагрузки от окружающей среду, протекающая от одного среднестатистического жителя Европы (рассчитывается отношением общей нагрузки на окружающую среду, связанной с полными выбросами какого-либо вредного вещества в Европе, к общему количеству жителей Европы и умножением на 1000) [12].

Отметим три категории ущерба. При оценке влияния на здоровье человека (т.е. на число и продолжительность болезней и на длительность жизни) определяется влияние системы на: изменение климата; разрушение озонового слоя; выбросы канцерогенов; радиоактивное излучение; вредные выбросы в атмосферный воздух. При оценке влияния на качество экосистемы (т.е. на биоразнообразие) определяются: выбросы экотоксинов; вклад в образование кислотных дождей; эвтрофикация водоемов; разрушение почвы. При оценке влияния на истощение природных ресурсов определяется истощение минеральных и топливных ресурсов. Разработана обширная база данных для определения качества и количества вредных воздействий и выбросов при производстве определенных материалов, необходимая для выполнения расчетной программы ПЖЦ. После учета весовых коэффициен-

тов и суммирования всех вредных воздействий получается экоиндикатор, имеющий размерность Pt (эко-единица), который можно использовать для сравнения альтернативных объектов. Наиболее спорным моментом является определение веса каждой категории, поскольку они имеют разные размерности (влияние на изменения климата – кг CO₂, на разрушение озонового слоя – кг R11, влияние на образование кислотных дождей – кг SO₂). В работе этот этап анализа выполнялся с использованием базы данных программы “SimaPro-6”. При выполнении анализа, использовались средние данные для стран Евросоюза.

Был рассмотрен конкретный пример альтернативного охладителя на основе ПИО/ХМ, где в первой ступени используется ПИО на основе пористой керамики, а во второй – крышный кондиционер французского производства СААЕ/САЕН–31; для сравнения был взят кондиционер СААЕ/САЕН–51 (холодопроизводительность у сравниваемых вариантов одинакова). На рисунке 3 представлены результаты анализа. Видно, что по всем трем категориям экологического воздействия, традиционная пароконденсационная СКВ уступает альтернативной на всех стадиях жизни. Наибольшее воздействие на окружающую среду производится во время эксплуатации системы и связано с энергопотреблением системы.

Общее экологическое воздействие в этот период для альтернативной системы составляет до 65% от этого же воздействия для традиционной!

ВЫВОДЫ

1. Наиболее перспективно использование аппаратов пленочного типа с многоканальной пористой керамической структурой насадки. Применение насадки из пористой керамики позволяет увеличить эффективность испарительного охлаждения воздуха.

2. Комбинированные испарительно – пароконденсационные системы охлаждения воздуха и воды обеспечивают снижение энергозатрат на 14-60% в зависимости от их типа и назначения и позволяют существенно повысить экологическую чистоту новых решений.

3. Комбинированная СКВ оказывается полностью замкнутой по потребляемой воде при параметрах наружного воздуха $t_A=32^\circ\text{C}$ и $X_A>13\text{г/кг}$ (в системе ПИО/ХМ) и при $t_A=32^\circ\text{C}$ и $X_A>12\text{г/кг}$ (в системе НИО/ХМ), поскольку затраты воды в ступени испарительного охлаждения могут быть полностью компенсированы конденсатом из испарителя холодильной машины.

4. Использование испарительного охлаждения в первой ступени позволяет уменьшить нагрузку на конденсатор холодильной машины, снижая температуру конденсации, что в свою очередь позволяет применять комбинированные системы таких типов в любых климатических условиях.

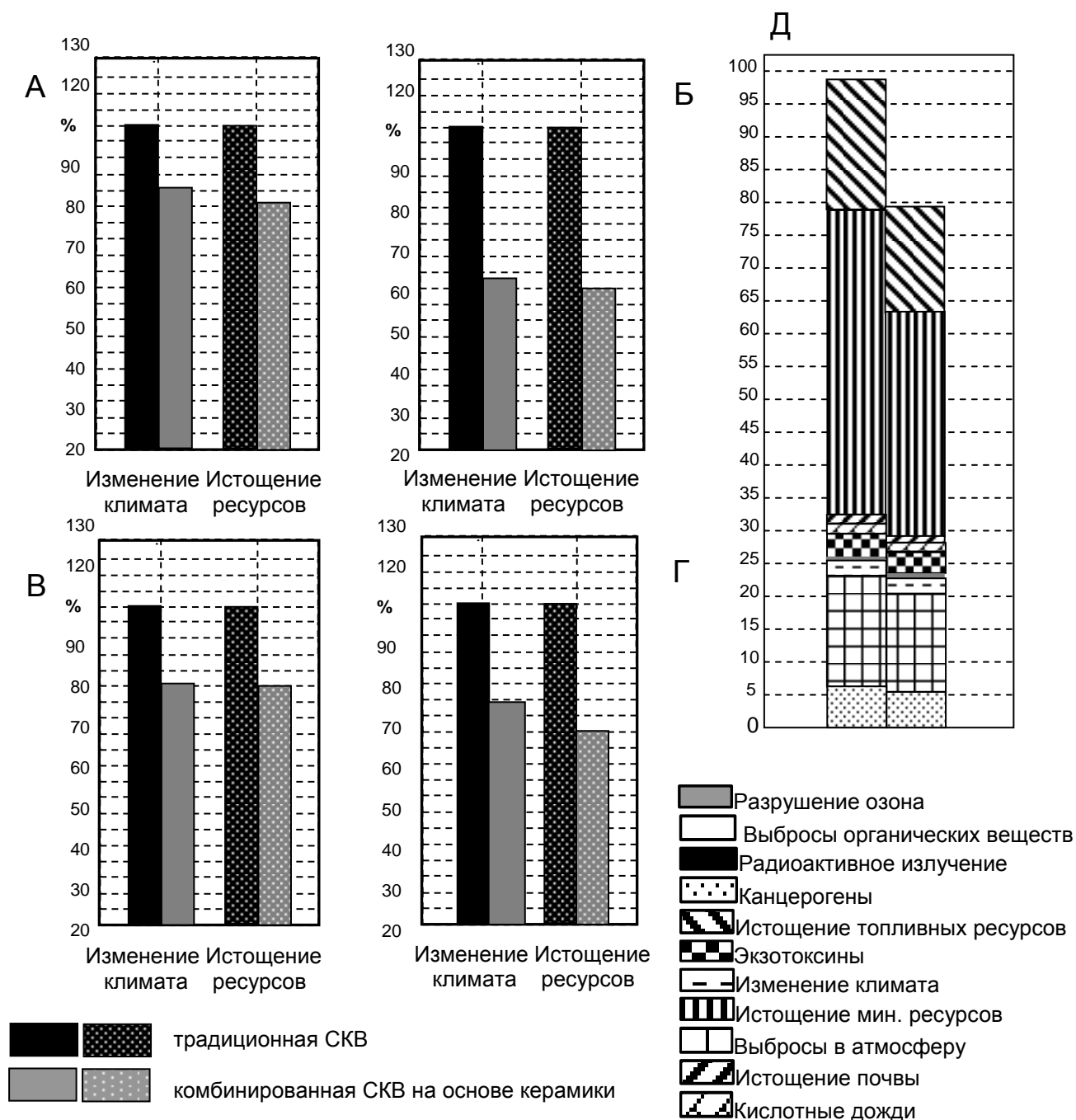


Рисунок 3 – Сравнение экологического воздействия («полного жизненного цикла») традиционной (XM) и альтернативной (на основе ПИО/XM) систем.

А – Стадия производства; Б – Стадия эксплуатации; В – Стадия утилизации и рециркуляции материалов и энергии; Г – Полный жизненный цикл сравниваемых систем XM и ПИО/XM.

Д – Сравнение экологического воздействия на стадии производства для традиционной и комбинирующей СКВ на основе ПИО/XM, с ПИО из пористой керамики.

5. Развитие испарительно-парокомпрессионных систем позволяет снять климатические ограничения применимости испарительных методов охлаждения и существенно улучшить энергетические и экологические показатели альтернативных систем в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. 2-е переработанное и дополненное издание. – Донецк.: Норд-Пресс, 2007. – 362 с.

2. Дорошенко А.В. 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. Maisotsenko V., Lelland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling 21st International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C.
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. E.V. Gomes, F.J. Rey Martinez, F. Varela Diez, M.J. Molina Leyva, R. Herrero Martin. Description and Experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler. Int/ Journal of Refrigeration. 28-2005. P. 654-662.
6. 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.
7. Jose Rui Camargo, Carlos Daniel Ebinuma, Jose Luz Silveira, Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city. Int. J. Refrig., vol. 21, (28) - 2005. - P. 1124-1132.
8. Davis Energy Group", California, Energy Commission, 2004
9. Torcollini P., National Renewable Energy Laboratory, 2003
10. Energy Conservation and Management Division (Energy, Minerals and Natural Resources Department), 2002
11. 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.
12. 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

Получена в редакции 04.03.2013, принята к печати 07.03.2013