

УДК 536.248.2:532.529.5

**Л. В. ИВАНОВА****НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИСПАРИТЕЛЬНЫЕ ВОДООХЛАДИТЕЛИ. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЭКОЛОГО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Разработано принципиальные решения выпарных водо- и воздухоохлаждающих непрямого типа с пониженным пределом охлаждения. Новые решения позволяют понизить предел испарительного охлаждения сред в охладителях-чиллерах от температуры мокрого термометра до температуры точки росы. Насадка тепло-массообменных аппаратов пленочного типа выполнена на основе моноблочных многоканальных композиций из полимерных материалов. Выполнен, на основании полученных экспериментальных данных по эффективности процессов тепло-массообмена, сравнительный анализ возможностей разработанных водоохлаждающих, подтвердивший высокую эффективность новых решений. Выполнен сравнительный энерго-экологический анализ СКВ традиционного типа (парокомпрессионной) и разработанной альтернативной солнечной системы кондиционирования воздуха ССКВ, показавший значительные преимущества новых решений

**Ключевые слова:** непрямо испарительное охлаждение, воздухоохлаждающий-чиллер, водоохлаждающий-чиллер, тепло-массообменная аппаратура, Полный Жизненный Цикл.

**Л. В. ИВАНОВА****НИЗКОТЕМПЕРАТУРНИ ВИПАРНІ ВОДООХЛАДЖУВАЧІ. АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ І ЕКОЛОГО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК**

Разработаны принципиальные решения испарительных водо- и воздухоохлаждающих непрямого типа со сниженным пределом охлаждения. Новые решения позволяют понизить предел испарительного охлаждения сред в охладителях-чиллерах от температуры мокрого термометра поступающего в охладитель воздуха до температуры точки росы. Насадка тепло-массообменных аппаратов пленочного типа выполнена на основе моноблочных многоканальных композиций из полимерных материалов. Выполнен, на основании полученных экспериментальных данных по эффективности процессов тепло-массообмена, сравнительный анализ возможностей разработанных водоохлаждающих, подтвердивший высокую эффективность новых решений. Выполнен сравнительный энерго-экологический анализ СКВ традиционного типа (парокомпрессионной) и разработанной альтернативной солнечной системы кондиционирования воздуха ССКВ, показавший значительные преимущества новых решений

**Ключевые слова:** непрямо испарительное охлаждение, воздухоохлаждающий-чиллер, водоохлаждающий-чиллер, тепло-массообменная аппаратура, Полный Жизненный Цикл.

**L. V. IVANOVA****LOW-TEMPERATURE EVAPORATIVE WATER COOLERS. ANALYSIS OF OPPORTUNITIES AND ENVIRONMENTAL-ENERGY CHARACTERISTICS**

Basic solutions for evaporative water and air coolers of indirect type with a reduced cooling limit have been developed. New solutions allow to reduce the evaporative cooling limit of the fluids in the chiller chillers from the temperature of the wet thermometer entering the air cooler to the dew-point temperature. The nozzle of heat-mass-exchange apparatus of film type is made on the basis of monoblock multichannel compositions made of polymer materials. Based on the experimental data on the efficiency of heat-mass transfer processes, a comparative analysis of the capabilities of the developed water coolers was confirmed, which confirmed the high efficiency of the new solutions. A comparative energy-ecological analysis of the traditional type of SCR (vapor compression) and the developed alternative solar air conditioning system SACS, which showed significant advantages of new solutions

**Keywords:** indirect evaporative cooling, air-cooler-chiller, water-chiller, heat-mass transfer equipment, Full Life Cycle.

**Введение.** Интерес к возможностям испарительного охлаждения сред в последние годы неуклонно возрастает, что обусловлено их малым энергопотреблением и экологической чистотой [1–7, 9, 13]. Широкое практическое применение находят испарительные охладители ИО прямого типа (воздухоохладители и водоохладители-градирни ГРД, cooling tower, СТВ) и непрямого типов (воздухо- и водоохладители НИО, indirect evaporative cooling, ИЕС). Возможности таких охладителей по достигаемому температурному уровню охлаждения ограничены температурой наружного воздуха по мокрому термометру  $t_m$ , являющейся естественным пределом охлаждения, их эффективность существенно зависит от местных климатических условий.

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами.** Разработка схемных решений СКВ на основе низкотемпературных испарительных водо- и воздухоохлаждающих. Значительный интерес в последние годы вызывают ИО со сниженным пределом испарительного охлаждения сред [10–12]. Снижение температурного уровня охлаждения

обеспечивает и общее уменьшение количества воды, используемой в ИО, что для современных энергетических систем означает реальное уменьшение количества воды, требуемое для компенсации потерь на испарение. Рассмотрим схемные решения СКВ на основе низкотемпературных испарительных водо- и воздухоохлаждающих, в т.ч. особенности схемных решений СКВ, основанные на низкотемпературном воздухоохладителе – чиллере Chg (рис. 1). Рассмотрены два варианта СКВ: на основе разработанного воздухоохлаждителя Chg (рис. 1, А и В) и Chg\* (1, Б и Г). Во втором случае (эта схема менее энергозатратна, поскольку в помещение поступает весь обработанный в воздухоохладителе воздушный поток) в помещение подается охлажденный и увлажненный воздушный поток, что сужает возможную область практического использования таких решений по уровню начального влагосодержания наружного воздуха с точки зрения обеспечения требуемых комфортных параметров воздуха в помещении.

© Иванова Л. В., 2018

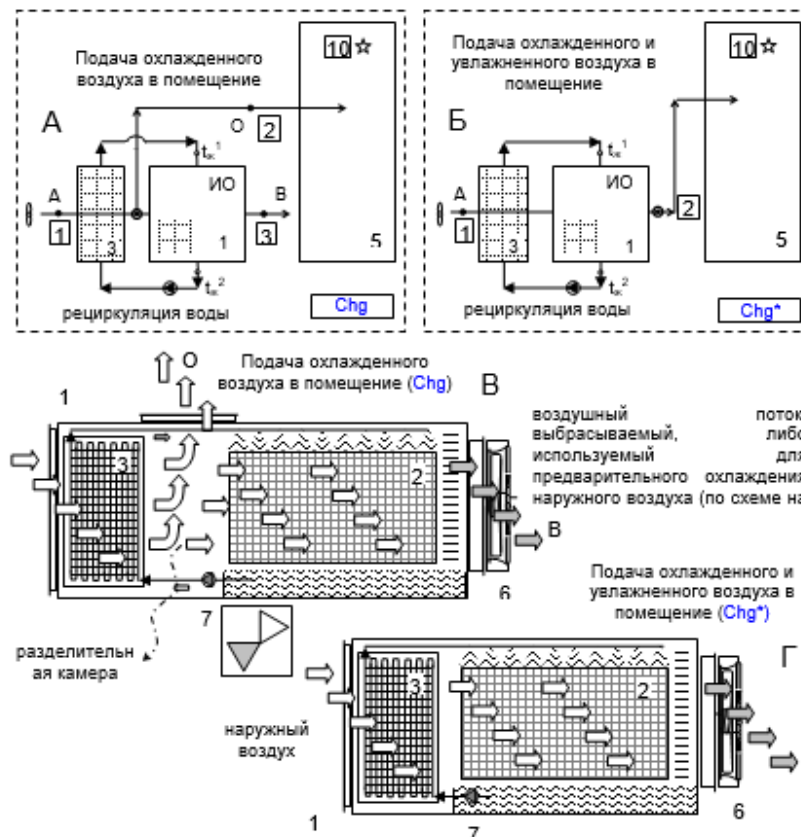


Рис. 1. Принцип компоновки (А и Б) системы кондиционирования воздуха СКВ на основе испарительного воздухоохладителя (В, чиллер Chg; Г, чиллер Chg\*), с подачей в помещение охлажденного (А и В), или охлажденного и увлажненного (Б и Г) воздуха: 1 – Chg (ИО); 1\* – Chg\* (ИО); 2 – насадка поперечноточного теплообменного аппарата; 3 – водо-воздушный теплообменник; 5 – помещение; 6 – вентилятор; 7 – насос. А – наружный воздух.

Выделенными номерами точек обозначены параметры потоков воды и воздуха

Насадочная часть ИО представляет собой многоканальную структуру из полимерного материала; схема контактирования потоков в аппарате может быть, как противоточной, так и поперечноточной. Выбор режимных параметров и геометрии насадочной части ИО рассмотрен в работах авторов [1–7].

Решения для альтернативных систем кондиционирования воздуха СКВ, основанное на низкотемпературном водоохладителе – чиллере Chw приведены на рис. 2. Здесь охлажденная вода поступает в расположенный в водо-воздушный теплообменник (fan-coil), обеспечивая конвективное охлаждение воздуха в обслуживаемом помещении. В расчетах производительности системы следует учитывать обновление воздуха в помещении, то есть поступление свежего наружного воздуха. Выбрасываемый из низкотемпературного ИО воздушный поток (3) может использоваться для предварительного охлаждения в теплообменнике 3\* поступающего в ИО наружного воздуха.

**Изложение основного материала исследований.** Анализ работы СКВ на основе воздухоохладителя Chg. На Н-Х диаграмме влажного воздуха (рис. 3), на основе полученных в работе экспериментальных данных, приведен анализ работы

воздухоохладителя Chg (схема по рис. 4. А и В) при различных начальных влагосодержаниях воздуха  $x_r^1$  (при одинаковом во всех случаях соотношении воздушных потоков  $l = G_o/G_B = 1,0$ ). Полный воздушный поток охлаждается при неизменном влагосодержании в теплообменнике 7 и здесь делится на «основной» поток (О), поступающий в помещение и «вспомогательный» поток (В), поступающий в испарительный воздухоохладитель ИО. Линия изменения состояния «основного» потока (1 – 1«О», 2 – 2«О», 3 – 3«О») протекает при постоянном значении влагосодержания воздуха. Для степени приближения к пределу охлаждения  $\Delta t^{**} = (t_o - t_p)$ , получены результаты:

$$x_r^1 = 16 \text{ г/кг: } t_o = 24,3 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta t^{**} = 4,0 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$x_r^1 = 11 \text{ г/кг: } t_o = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta t^{**} = 5,5 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$x_r^1 = 9 \text{ г/кг: } t_o = 17,5 \text{ }^\circ\text{C}, \Delta t^{**} = 6,0 \text{ }^\circ\text{C},$$

то есть: – со снижением начального влагосодержания воздуха уровень охлаждения основного воздушного потока значительно снижается, но при этом уменьшается и степень приближения к пределу охлаждения.

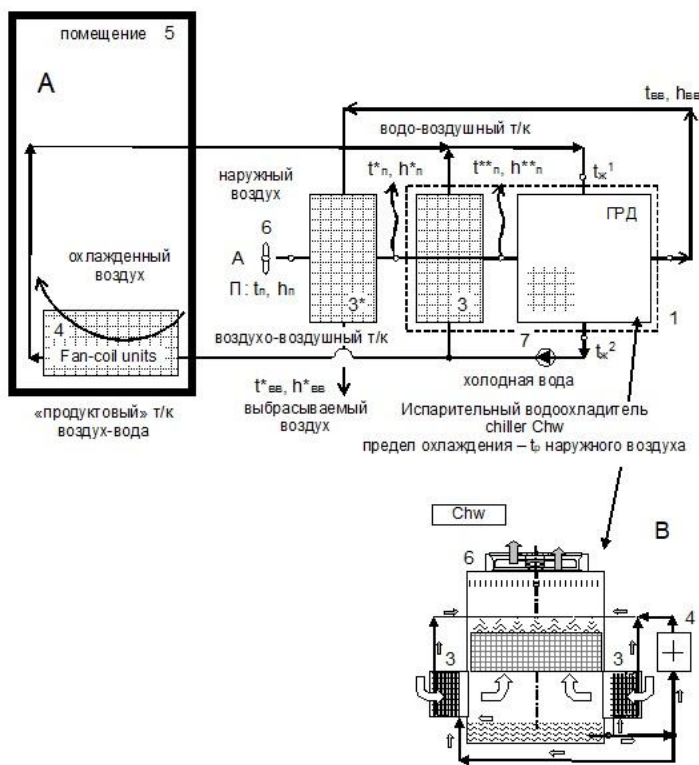
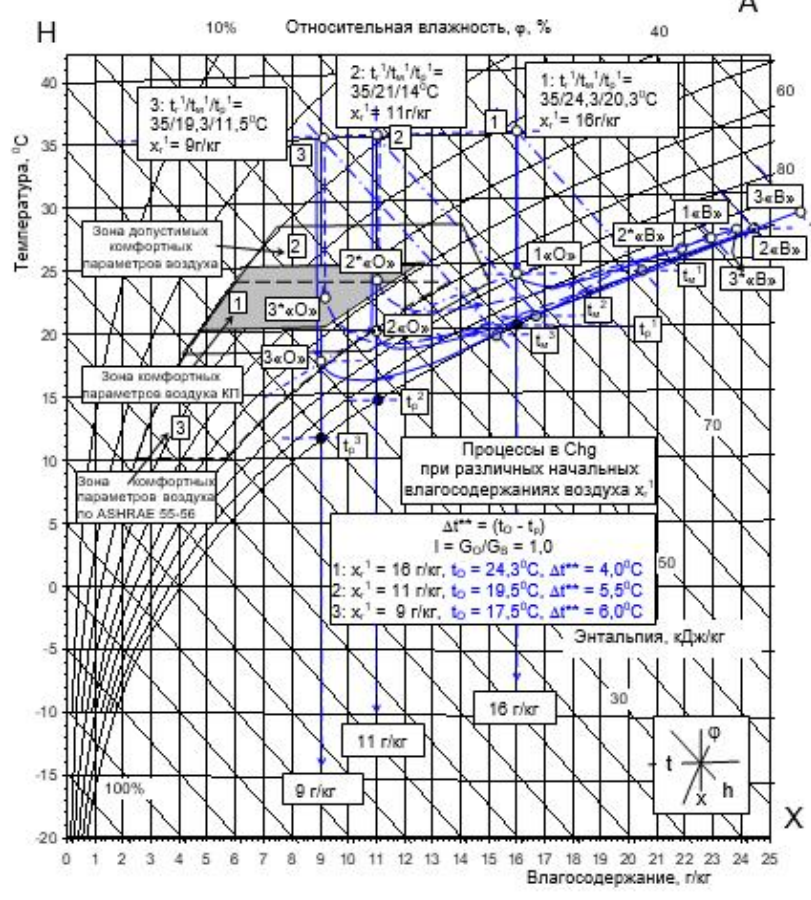


Рис. 2 – Принцип компоновки (А) системы кондиционирования воздуха СКВ на основе испарительного охладителя воды (В), чиллера (Chw), с подачей в помещение холодной воды и использованием холодного увлажненного воздушного потока, покидающего испарительный водоохладитель для предварительного охлаждения наружного воздуха, поступающего в Chw: 1 – Chw в составе градирни ГРД и теплообменников 3 и 3\*; 4 – водо-воздушный т-к в охлаждаемом помещении (fan-coil); 5 – помещение; 6 – вентилятор; 7 – насос. А – наружный воздух



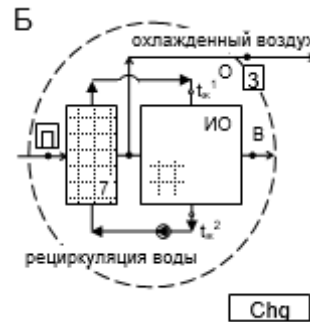


Рис. 3 – Анализ работы СКВ (по рис. 4 А и В) на основе воздухоохлаждителя Chq при различных начальных влажосодержаниях воздуха  $x_{r1}$  (при  $l = G_0/G_B = 1,0$ ). Процессы 2-2\*(O)-2\*(B) и 3-3\*(O)-3\*(B) приведены для соотношения основного и вспомогательного воздушных потоков  $l = G_0/G_B = 0,8$ . На рисунке выделена зона комфортных (1 – зачернена), допустимых комфортных параметров воздуха (2) и зона комфортных параметров воздуха по ASHRAE 55-56 (3 – выделена пунктирными линиями) в помещении

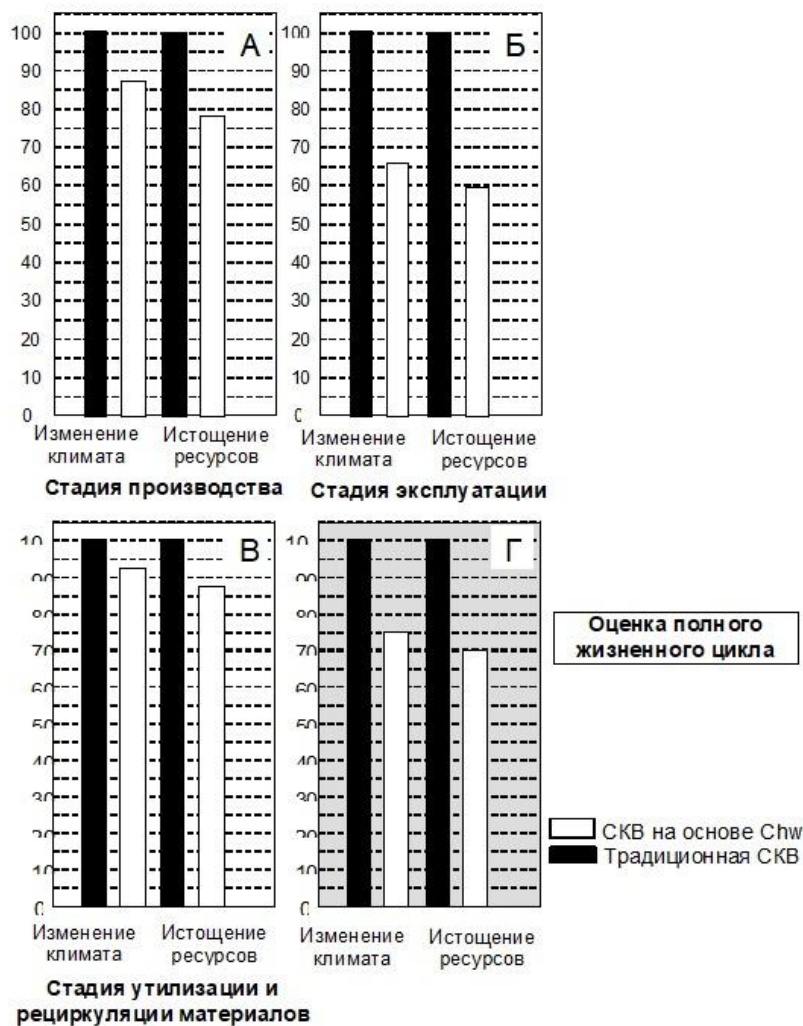


Рис. 4 – Сравнение экологического воздействия на стадиях: производства (А), в период эксплуатации оборудования (Б), утилизации оборудования (В) и в полном жизненном цикле сравниваемого оборудования (Г) для традиционной СКВ парокомпрессионного типа (воздушный кондиционер СААЕ/САЕН-51, Франция) и разработанной СКВ на основе Chw

Кривая изменения состояния вспомогательного воздушного потока  $G_B$  последовательно выгибается в сторону острого «угла» Н-Х диаграммы влажного воздуха, как бы «упираясь» в предел охлаждения

(линии изменения состояния вспомогательного воздушного потока в чиллере «1O» – «1B» ... «3O» – «3B») и изменение состояния потока «B» в дальнейшем протекает непосредственно вдоль

равновесной кривой  $\phi = 100\%$ , то есть этот поток полностью насыщается еще до выхода из аппарата; – возможно, будет целесообразно при переходе к реализации испарительного охлаждения в СКВ на малых величинах начальных влагосодержаний, снижать соотношение потоков  $l = G_O/G_B$ . На рисунке выполнен такой анализ и видно, что для получения комфортных параметров основного воздушного потока, поступающего в помещение можно увеличить расход основного воздушного потока (процессы 2-2\*(O) -2\*(B) и 3-3\*(O) -3\*(B) приведены для соотношения основного и вспомогательного воздушных потоков  $l^* = G_O/G_B = 0,8$ ), что снижает реальные энергозатраты в СКВ. При этом видно, что линии изменения состояния вспомогательного воздушного потока в чиллере «2\*O» – «2\*B» и «3\*O» – «3\*B» протекают уже не по равновесной кривой  $\phi = 100\%$ , то есть вспомогательный воздушный поток до выхода из насадки ТМА не насыщен и опасность «реконденсации» в нем, а, следовательно, и снижения эффективности процесса отсутствует.

#### **Сравнительный эколого-энергетический анализ разработанных СКВ и систем кондиционирования традиционного типа.**

Этот раздел посвящен анализу полного жизненного цикла двух сравниваемых систем предназначенных для кондиционирования воздуха: традиционной и альтернативной, выполненный на основе методологии «оценки полного жизненного цикла» системы. Методология «Полный жизненный цикл» (ПЖЦ, Life Cycle Assessment, LCA) по определению SETAC [8, 14] – это: оценка экологического воздействия продукции (процесса), путем установления и количественного определения всех используемых за полный жизненный цикл продукции (процесса) энергии и материалов, и соответствующих вредных выбросов в окружающую среду; оценка возможности снижения экологического воздействия анализируемой продукции (процесса). Методология LCA разработана в соответствии со стандартами ISO 14040 (ISO 14040, 14041, 14042 и 14043). Методику расчета экологических индикаторов за полный жизненный цикл системы применяют для сравнения различных альтернативных систем (продуктов, технологий и т.п.) с целью выбора системы, оказывающей наименьшее влияние на окружающую среду. Рассчитанные в рамках методологии LCA критерии можно использовать также для выявления потенциальных возможностей снижения антропогенной нагрузки рассматриваемого оборудования. Выполнение оценки с помощью метода LCA позволяет проанализировать антропогенное воздействие на стадиях производства, использования и утилизации рассматриваемого объекта, то есть в пределах полного жизненного цикла существования продукта. В самом общем случае, при анализе, учитываются: расход энергии и

выделения вредных веществ при производстве конструкционных материалов для рассматриваемого объекта; потребление энергии и других расходных материалов (например, хладагента в СКВ традиционного типа) при эксплуатации объекта; дополнительные затраты энергии при утилизации объекта (либо получение энергии при рециркуляции материалов утилизируемого объекта) и все сопутствующие выбросы вредных веществ.

Для оценки перспективности применения альтернативных систем СКВ были выбраны эколого-энергетические критерии, которые, при нынешнем состоянии промышленности, определяют направления ее дальнейшего развития: влияние полного жизненного цикла сравниваемых систем на: – глобальное изменение климата (соответствует полной эмиссии парниковых газов); – истощение природных ресурсов при создании, эксплуатации и утилизации систем (соответствует полному потреблению органического топлива и минеральных ресурсов за полный жизненный цикл системы); ущерб, наносимый окружающей природной среде, т.е. соответствующие данному ущербу эко-индикаторы (отдельно может учитываться ущерб человеческому здоровью, экосистеме и истощение природных ресурсов). Расчет всех выбранных критериев основан на методологии ECO-INDICATOR 99. Этот метод был разработан по Dutch NOH программе совместного проекта с Philips Consumer Electronics, NedCar (Volvo/Mitsubishi), Océ Copiers, Schuurink, CML Leiden, TU-Delft, IVAM-ER and CE Delft [14]. В соответствии с широко распространенной в настоящее время методикой оценки полного эквивалента глобального потепления, влияние на изменение климата принято выражать через кг CO<sub>2</sub>.

При расчетах влияния на изменение климата, учитываются все выбросы CO<sub>2</sub>: имевшие место при производстве энергии и материалов, а также при эксплуатации оборудования и его утилизации. Кроме того, учитываются выбросы всех других парниковых газов на всех стадиях полного жизненного цикла.. Вклад парниковых газов в изменение климата также вычисляется в кг CO<sub>2</sub> (пересчитывается с помощью специальной величины GWP парникового газа, кг/кг CO<sub>2</sub>). 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 основные категории ущерба: влияния на здоровье человека, качество экосистемы и истощение ресурсов, оцениваются 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 на окружающую среду, проистекающая от одного среднестатистического жителя Европы (это значение 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). Здесь так же следует отметить те вредные воздействия, которые отвечают за перечисленные выше три категории ущерба.

В настоящее время разработана обширная база данных для определения качества и количества различных вредных воздействий и выбросов при производстве определенных материалов, необходимая для выполнения расчетной программы LCA. Следует отметить, что первым и обязательным шагом при выполнении такого анализа является определение всех использованных ресурсов на всех стадиях жизненного цикла рассматриваемой системы. Это является стандартной процедурой в анализе LCA. При оценке эко-индикаторов (эко-индикаторов-99) после выполнения первой стадии осуществляется последовательно следующие два шага: расчет вредного влияния всех этих потоков на здоровье человека, качество экосистемы и ресурсы; определение веса каждой этой категории вреда.

После учета весовых коэффициентов и суммирования всех вредных воздействий получается экоиндикатор, имеющий размерность  $Pt$  (эко-единица), который можно использовать для сравнения альтернативных объектов. Следует отметить, что наиболее критическим и спорным моментом является именно определение веса каждой категории. Ведь некоторые из них имеют разные размерности (влияние на изменения климата – кг  $CO_2$ , на разрушение озонового слоя – кг R11, влияние на образование кислотных дождей – кг  $SO_2$ ). Оценить какой из этих факторов является более важным, сложно, а рассматривать каждый из них в отдельности невозможно для получения однозначного результата анализа.

В нашей работе этот этап анализа выполнялся с использованием базы данных программы «SIMAPRO-6». Сравнительный экологический анализ солнечных систем тепло- и хладоснабжения был выполнен на примере «полного жизненного цикла» СКВ традиционного и нового типа. Метод LCA используется в качестве инструмента для выбора оптимального направления разработок и может использоваться для определения времени возврата энергии, затраченной на производство и установку солнечных систем и их отдельных элементов.

В модели LCA была рассчитана полная используемая энергия и выбросы, связанные с производством, перевозкой и получением 1 кг материала, использованного при изготовлении каждого ТМА холодильной системы как традиционного, так и нового типа. Все стадии цикла жизни были включены в модель и оценены.

Стадия уничтожения материалов также включает потребление энергии. Для большинства материалов эта энергия и выбросы увеличиваются во время разборки изделия и перевозки материалов и при переработке или уничтожении, однако, большая часть материалов может быть переработана.

В модели LCA было сделано допущение о том, что 50 % алюминия впоследствии перерабатываются, а 50 % пластика сжигается для производства электроэнергии.

**Сравнительный экологический анализ традиционных систем кондиционирования воздуха СКВ и альтернативных СКВ на основе низкотемпературного водоохладителя Chw.**

В работе последовательно выполнялась оценка перечисленных выше критериев для трех основных стадий жизненного цикла сравниваемых СКВ на стадиях: *производства, эксплуатации и утилизации*. Выполнение анализа с помощью метода «полного жизненного цикла» ПЖЦ (LCA) позволяет проанализировать все стадии двух сравниваемых установок, традиционного типа – пароконденсационной СКВ, и альтернативной СКВ, учитывая производство материалов системы, хладагента, а также упрощенные производственные процессы при создании обеих СКВ. При анализе не рассматривалась система воздухопроводов (система распределения потоков воздуха и воды) в кондиционируемом здании, поскольку для сравниваемых систем она практически (примерно) идентична.

Анализ уровня выбросов вредных веществ на стадии производства системы основан на полном жизненном цикле материалов, а это означает, что энергозатраты на производство материалов являются суммой энергозатрат на получение, обработку, подготовку и транспортировку соответствующих материалов.

Для выполнения анализа необходимо знать виды и массы материалов, из которых изготовлена система. В табл. 1. представлены данные по структуре материальных затрат на создание двух сравниваемых установок СКВ, массы материалов, а также мощности компрессора, вентилятора и водяного насоса. Для сравнения был взят крышный кондиционер французского производства CAAE/CAEN – 51, так чтобы холодопроизводительность у сравниваемых вариантов кондиционеров была примерно одинаковой ( $\approx 14.0$  кВт). Материалы, из которых состоят рассматриваемые системы, во многих случаях производятся в различных странах.

Получить надежные данные по затратам на производство энергии и эмиссии вредных веществ в различных процессах в разных странах достаточно проблематично. Поэтому, при выполнении анализа, использовались данные по выбросам в разных процессах, как средние для стран Евросоюза (они представлены в программе «SIMAPRO-6», с использованием которой и выполнялся анализ).

Так как основной целью работы является сравнение СКВ традиционного и альтернативного типов, то принятое допущение не скажется на качестве анализа и правильности сделанных выводов. Это означает, что, несмотря на реальную структуру производства электроэнергии в стране производителе конкретных материалов, при выполнении анализа учитывались вредные выбросы, соответствующие производству энергии в странах Евросоюза. Выбросы при повторном использовании и утилизации материалов принимались такими же, как в среднем по странам ЕС.

**– Стадия производства сравниваемых СКВ.**

В стадии производства учитывается влияние следующих процессов: добычи сырья, включая добычу нефти и газа для производства: полимерных материалов для изготовления насадки ТМА; металлов; производства различных деталей СКВ, их сборки и транспортировки. материалов в ЕС).

Следует отметить, что, согласно методологии ПЖЦ, в данную стадию включено и повторное использование металлов. В модели принято, что 50% стали, 40% меди и 30% алюминия произведено из металлолома (это соответствует средним данными по повторному использованию материалов в ЕС).

На рис. 4 представлены основные результаты. Расчет вредного воздействия оценивался с использованием базы данных программы SIMAPRO-6 с учетом расхода энергии на изготовление установки из различных материалов (металлов, пластика) и на производство хладагента (в данном случае это R22).

Как видно из результатов анализа стадии создания оборудования (рис. 4А), по всем категориям экологического воздействия традиционная СКВ уступает альтернативной.

Таблица 1 – Технические характеристики сравниваемых СКВ

Технические характеристики рассматриваемых систем (холодопроизводительность состав, материал, вес)	Традиционная система СКВ (воздушный кондиционер СААЕ/САЕН-51, производства Франции)	Система СКВ на основе низкотемпературного испарительного охладителя воды, чиллера (Chw)
Холодопроизводительность, кВт	14.3	14.0
Компрессор:		
Корпус (сталь 45), кг	45.0	–
Провода (медь), кг	2.3	
Вентилятор:		
Двигатель (сталь 45), кг	6.0	3.6
Импеллер (алюминий), кг	2.0	2.6
Провода (медь), кг	1.1	3,0
Жидкостные насосы:		
Двигатель (сталь 45), кг	–	1.5
Провода (медь), кг		2.5
Воздушный конденсатор ХМ:		
Корпус (сталь 45), кг	6.9	–
Рёбра (алюминий), кг	9.0	
Трубки (медь), кг	9.3	
Воздухоохладитель (испаритель) ХМ:		
Корпус (сталь 45), кг	5.4	–
Рёбра (алюминий), кг	7.9	
Трубки (медь), кг	8.6	
Хладагент (R22), кг	4.0	
Осушитель воздуха:		
Корпус (сталь 45), кг	1.5	–
Алюминий, кг	3.7	
Медь, кг	4.0	
Парогенератор (нержавеющая сталь), кг	20.0	–
Фильтр, рамка, элементы фильтра (сталь), кг	100.5	96.0
Испарит. водоохладитель Chw:		
– насадка, кг;	–	4.0
– крепежная рама, кг		2.0
Теплообменники жидкость-жидкость, медь (3 шт.), кг	–	15x3
Общий вес	237.3	189.9

#### – Стадия эксплуатации сравнимых систем.

На стадии эксплуатации СКВ учитываются энергопотребление систем (с учетом структуры производства электроэнергии в Украине: тепловые электростанции – 49 %, атомные электростанции – 43% и гидроэнергетика – 8% [1,14]) и утечек хладагента (принимая утечки хладагента 3% от его общей массы в год для парокомпрессионной СКВ).

Потребление электроэнергии компрессором, вентилятором и водяным насосом за время эксплуатации СКВ количественно определены с учетом профиля нагрузки за сутки (при вычислении величины этой нагрузки предполагалось, что минимальная суточная производительность СКВ – 20% в рабочем режиме).

Используя данные по климатическим условиям для Одесского региона в течение года, установленную холодопроизводительность для каждой СКВ, и, принимая, что средняя продолжительность эксплуатации рассматриваемых СКВ одинакова и примерно равна 10 годам, был проведен анализ периода эксплуатации СКВ (рис. 4.Б), показавший, что по всем основным категориям экологического воздействия традиционная СКВ так же уступает альтернативной СКВ. Здесь разница еще более существенна, чем для периода производства рассматриваемых систем.

#### – Стадия утилизации СКВ.

Предполагается, что после окончания срока эксплуатации СКВ демонтируется и направляется на утилизацию. Металлические детали отправляются на повторное использование, а хладагент под давлением извлекается и транспортируется на утилизацию (например, его разрушают пиролизом с получением в качестве конечного продукта веществ, содержащих аргон, диоксид углерода и водяной пар). При оценке влияния этой стадии на общее экологическое воздействие учитывалась также транспортировка (на расстояние 100 км для металлолома и 300 км для утилизации хладагента, – это усредненные параметры, принятые для ЕС). Как видно из приведенных результатов (рис. 4.В), и на этой стадии преимущества сохраняются за альтернативной системой.

#### – Экологическое воздействие за полный жизненный цикл.

Для объективной оценки и окончательных выводов по перспективам применения той или иной альтернативной системы следует оценить экологическое воздействие за полный жизненный цикл.

Общее экологическое воздействие для обеих СКВ представлено на рис. 4Г. Результаты выполненного экологического анализа традиционной и альтернативной систем кондиционирования воздуха позволяют сделать вывод о преимуществе последней.

Как видно из выполненного исследования, разработанная система СКВ оказывает существенно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, чем традиционная по всем основным сравнимым категориям.

Альтернативная система СКВ, основанная на использовании низкотемпературного водоохладителя приводит к меньшему истощению природных ресурсов ( $\approx$  на 30%, в т.ч. и энергоресурсов), что говорит о ее большей энергетической эффективности и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата ( $\approx$  на 25%).

Следует отметить, что высокая энергоэффективность и низкий вклад в глобальное потепление напрямую связаны друг с другом, поскольку наибольший вклад в изменение климата вносят выбросы  $\text{CO}_2$  от потребляемой электроэнергии. Поэтому выбор альтернативного оборудования по двум анализируемым критериям (влияние на истощение природных ресурсов и вклад в глобальное потепление) будет способствовать реализации закона Украины об энергосбережении и Киотского протокола (направленного на снижение эмиссии парниковых газов).

Общее экологическое воздействие для традиционной системы так же больше, чем для альтернативной, что еще раз подтверждает преимущества последней.

Полученные результаты показывают, что наибольшее воздействие на окружающую среду производится во время эксплуатации системы. Причем наибольшее влияние в этот период связано с энергопотреблением СКВ.

#### Выводы.

1. Выполнен анализ принципиальных возможностей разработанных низкотемпературных испарительных воздухоохладителей Chg, показавший, что:

– со снижением начального влагосодержания воздуха уровень охлаждения основного воздушного потока в Chg значительно снижается, при этом уменьшается и степень приближения к пределу охлаждения;

– кривая изменения состояния  $G_B$  последовательно выгибается в сторону острого «угла» H-X диаграммы влажного воздуха и изменение состояния потока «В» в дальнейшем протекает непосредственно по равновесной кривой  $\phi = 100\%$ ;

– возможно, будет целесообразно при переходе к реализации испарительного охлаждения в Chg на малых величинах начальных влагосодержаний, снижать соотношение потоков  $l = G_O/G_B$ ;



2. Выполнен общий экологический анализ новых решений в области разработанных испарительных низкотемпературных охладителей сред с использованием методологии и базы данных «Полный жизненный цикл»; как видно из выполненного исследования, разработанная система СКВ на основе чиллера-водоохладителя Chw оказывает существенно меньшее вредное воздействие на окружающую среду, чем традиционная по всем основным сравниваемым категориям:

– альтернативная система СКВ, основанная на использовании низкотемпературного водоохладителя приводит к меньшему истощению природных ресурсов ( $\approx$  на 30%, в т.ч. и энергоресурсов), что

говорит о ее большей энергетической эффективности и вносит меньший вклад в глобальное изменение климата ( $\approx$  на 25%);

– следует отметить, что высокая энергоэффективность и низкий вклад в глобальное потепление напрямую связаны друг с другом, поскольку наибольший вклад в изменение климата вносят выбросы  $\text{CO}_2$  от потребляемой электроэнергии;

– общее экологическое воздействие для традиционной системы так же больше, чем для альтернативной, что еще раз подтверждает преимущества последней.

### Список литературы:

1. Doroshenko A.V., Glauberman M.A. *Alternative energy [Alternative energy]. Refrigerating and Heating Systems*, [Odessa I.I. Mechnicow National University Press], 2012.
2. Guangming Chen, Kostyantyn Shestopalov, Alexander Doroshenko, Paul Koltun. Polymeric materials for solar energy utilization: a comparative experimental study and environmental aspects, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2015, vol. 54, pp. 796–805.
3. Foster R.E., Dijkstra E. *Evaporative Air-Conditioning Fundamentals: Environmental and Economic Benefits World Wide*. [Proc. Int. Conf. “Applications for Natural Refrigerants”, Aarhus, Denmark, IIR/IIR, 1996, pp. 101–109 (In English).
4. John L., McNab, Paul McGregor. *Dual Indirect Cycle Air-Conditioner Uses Heat Concentrated Dessicant and Energy Recovery in a polymer Plate Heat Exchanger*. [Proc. 21 International Congress of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.
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, pp. 463–471.
6. Zhao, X., Liu, S., Riffat, S.B. Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems. [Proc 43th Int Conf. “Building and Environment”], 2008, pp. 1902–1911.
7. Gomes E.V., Martinez F.J., Diez, F.V., Leyva, M.J., Martin, R.H. Description and experimental results of a semi-indirect ceramic evaporative cooler. *Int. Journal of Refrigeration*, 2005, vol. 28, pp. 654–662.
8. Martínez F.J., Gómez E.V., García C.M., Requena J.F., Gracia L.M., Navarro S.H, Guimaraes A.C., Gil J.M. Life cycle assessment of a semi-indirect ceramic evaporative cooler vs a heat pump in two climate areas of Spain. *Applied Energy*. 2011, vol. 88, pp. 914–921.
9. *Method and Apparatus of Indirect-Evaporative Cooling*, Patent RF, no. US 6,497,107 B2, 2002.
10. *USA Patent No.:* US 6,497,107 B2. Dec. 24, 2002. Method and Apparatus of Indirect-Evaporative Cooling.
11. Maisotsenko V., Leland Gillan, M. 2003, The Maisotsenko Cycle for Air Desiccant Cooling. [Proc. 21<sup>st</sup> Int. Cong of Refrigeration IIR/IIF], 2003, Washington, D.C, ICR0646.
12. Denis Pandelidis, Sergey Anisimov, William M. Worec. Performance study of the Maisotsenko Cycle heat exchangers in different air-conditioning applications. *Intern. Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol.81, pp. 207–221.
13. Pascal Stabat, Dominique Marchio. Simplified model for undirect-contact evaporative cooling tower behaviour. France. *Applied Energy*. 78. 9 2004. pp. 433–451.
14. Koltun, P. Life Cycle Assessment of a Conventional and Alternantive Air-Conditioning Systems. P. Koltun, S. Ramakrishnan, A. Doroshenko, M. Kontsov. 21<sup>st</sup> International Congress of Refrigeration IIR/IIF, Washington, D.C, ICR0140, 2003, pp. 45–57.

Поступила (received) 25.06.2018

### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Іванова Лідія Володимирівна (Иванова Лидия Владимировна, Ivanova Lidia Volodymyrivna)** – магістр, асистент кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет, тел.: +097 941 0226; e-mail: leesoull18@gmail.com